



TUGAS AKHIR - TE141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI CYCLOCONVERTER SATU
FASA DENGAN EMPAT TRIAC**

Djainal Arifin
NRP 2210100106

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Mochammad Ashari, M.Eng.
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - TE141599

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SINGLE PHASE CYCLOCONVERTER WITH FOUR TRIAC

Djainal Arifin
NRP 2210100106

Advisor
Prof. Dr. Ir. Mochammad Ashari, M.Eng.
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI CYCLOCONVERTER SATU FASA
DENGAN EMPAT TRIAC**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

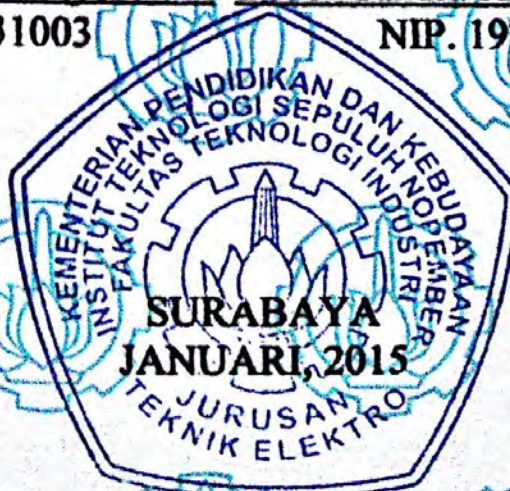
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

23/9/15

Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D. Dedet Candra Riawan S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 196510121990031003 NIP. 197311192000031001



DESAIN DAN IMPLEMENTASI CYCLOCONVERTER SATU FASA DENGAN EMPAT TRIAC

Nama : Djainal Arifin
Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.
Pembimbing II : Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Frekuensi *variable* sangat penting digunakan dalam dunia industri. Stasiun pembangkit listrik menghasilkan energi listrik dengan frekuensi 50 Hz yang tidak selalu dapat digunakan untuk beberapa peralatan listrik. Beberapa perangkat listrik membutuhkan frekuensi variabel mulai dari seperempat sampai setengah frekuensi input. Beberapa contoh adalah motor induksi yang digunakan di pasokan listrik pesawat, pasokan listrik pada mobil dan lain-lain. Oleh karena itu, pembangkitan frekuensi variabel menjadi sangat penting untuk memenuhi permintaan yang semakin meningkat dari aplikasi industri tersebut. Tujuan dari tugas akhir ini adalah merancang dan membuat alat *cycloconverter* satu fasa dengan empat triac sebagai rangkaian pensaklar.

Dari hasil pengujian *cycloconverter* satu fasa dapat disimpulkan bahwa alat yang telah dibuat sudah dapat digunakan untuk beban *resistif*. Frekuensi *output* yang dihasilkan bernilai 25 Hz, 16,7 Hz, dan 12,5 Hz dengan frekuensi *input* 50Hz. Sedangkan ketika *cycloconverter* diberi beban motor induksi satu fasa diperoleh kecepatan putar motor induksi 591,7rpm saat frekuensi keluaran 25 Hz, 371,7 rpm saat frekuensi keluaran 16,7 Hz, dan 238,4 rpm saat frekuensi keluaran 12,5 Hz.

Kata Kunci : Frekuensi *Variable*, Triac , *Cycloconverter*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DESIGN AND IMPLEMENTATION SINGLE PHASE CYCLOCONVERTER WITH FOUR TRIAC

Name : Djainal Arifin
Advisor I : Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.
Advisor II : Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

A variable frequency is very important in industry. The electricity produced by the power station often are not always 50 hz to be some electrical device. Some electrical devices require variable frequency ranging from one-quarter to one-half the input frequency. Some examples are induction motors used in aircraft power supply, power supply to the car and others. Hence, the generation of variable frequency is very important to meet a demand the increasing of application the industry. The purpose of this final project is to design and create the future cycloconverter tool with four triac single phase as a series of switches.

From the test results showed that the single phase cycloconverter tool that has been created can be used for resistive loads. The resulting output frequency is worth 25 Hz, 16.7 Hz and 12.5 Hz input frequency of 50Hz. Whereas when the cycloconverter given single phase induction motor load obtained rotational speed induction motor 591,7rpm current output frequency 25 Hz, 371.7 rpm when the output frequency of 16.7 Hz, and 238.4 rpm when the output frequency of 12.5 Hz.

Keywords : Variable Frequency, Triac, Cycloconverter

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Frekuensi variable sangat penting digunakan dalam dunia industry. Stasiun pembangkit listrik menghasilkan energy listrik dengan frekuensi 50 Hz yang tidak selalu dapat digunakan untuk beberapa peralatan listrik. Beberapa perangkat listrik membutuhkan frekuensi variabel mulai dari seperempat sampai setengah frekuensi input. Beberapa contoh adalah motor induksi yang digunakan di pasokan listrik pesawat, pasokan listrik mobil dan lain-lain. Oleh karena itu, pembangkitan frekuensi variabel menjadi sangat penting untuk memenuhi permintaan yang semakin meningkat dari aplikasi industri tersebut.

Cycloconverter pada dasarnya adalah AC-AC konverter daya dimana frekuensi output diubah langsung ke frekuensi yang lebih rendah dari frekuensi input tanpa melalui daya ke sinyal DC terlebih dahulu. *Cycloconverter* hanya digunakan untuk peralatan dengan daya tinggi lebih dari satu megawatt. Karena alasan teknis dan ekonomis *cycloconverter* tidak digunakan untuk penggunaan komersil. Munculnya thyristor dengan daya tinggi membuat minat terhadap rangkaian *cycloconverter* meningkat kembali[1].

Pada tugas akhir ini dirancang sebuah *cycloconverter* satu fasa dengan menggunakan empat triac. *Cycloconverter* merupakan sebuah konverter yang mengubah sinyal AC ke sinyal AC dengan frekuensi yang berbeda. Rentang frekuensi yang dapat diubah oleh sebuah *cycloconverter* adalah nol hingga sama dengan frekuensi dari sinyal input [2,3].

1.2 Permasalahan

Tugas akhir ini akan membahas model rangkaian AC-AC konverter. Selanjutnya akan membahas mengenai perancangan dan implementasi rangkaian AC-AC konverter. Kemudian, berdasarkan hasil perancangan dan implementasi rangkaian AC-AC konverter dapat dilihat tegangan serta frekuensi keluaran dari *cycloconverter* yang telah dibuat.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Simulasi menggunakan perangkat lunak.
2. Topologi rangkaian menggunakan empat triac.
3. Variansi frekuensi keluaran 25 Hz, 16,7 Hz dan 12,5 Hz.
4. Beban berupa lampu resistif dan motor induksi satu fasa.

1.4 Tujuan

Penelitian yang diajukan bertujuan untuk memahami dan mengerti bagaimana prinsip kerja AC to AC converter (*cycloconverter*). Memahami topologi rangkaian *cycloconverter* satu fasa dengan empat triac. Serta dapat digunakan sebagai referensi mahasiswa lain dalam mengerjakan tugas akhirnya.

1.5 Metodologi

Metodologi penelitian yang digunakan pada Tugas Akhir ini sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Dalam tahap ini dilakukan studi literatur yang dibutuhkan untuk pengerjaan dan penelitian Tugas Akhir (TA). Studi literatur meliputi pembelajaran mengenai rangkaian AC-AC Converter termasuk karakteristik dari komponen penyusunnya seperti triac dan thyristor. Selain itu, peralatan pendukung yang digunakan dalam implementasi dari TA ini juga turut dipelajari seperti Optocoupler, Transistor Gate Driver, Zero Crossing Detector, serta mikrokontroler. Literatur yang digunakan dalam studi literatur meliputi buku, jurnal ilmiah, prosiding, datasheet, dan artikel-artikel dari internet.

2. Pengumpulan Literatur

Setelah mempelajari literatur-literatur yang ada, maka dilakukan pengumpulan literatur tentang rangkaian AC-AC Converter. Selain itu, literatur dari peralatan pendukung juga dikumpulkan seperti Optocoupler, Transistor Gate Driver, Zero Crossing Detector serta mikrokontroler.

3. Pemodelan dan Simulasi

Berdasarkan literatur yang telah terkumpul dapat dihitung parameter-parameter rangkaian AC-AC Converter seperti nilai frekuensi, sudut penyalan serta bentuk gelombang gate yang akan diberikan. Setelah parameter-parameter dari rangkaian didapatkan, maka rangkaian AC-AC Converter dapat dimodelkan dan disimulasikan dalam perangkat lunak PSIM

4. Perancangan dan Implementasi dari Konverter

Dari simulasi yang dilakukan akan didapatkan model rangkaian AC-AC Converter dengan spesifikasi yang diinginkan. Selanjutnya model rangkaian hasil simulasi tersebut dirancang dan diimplementasikan menjadi sebuah alat atau prototype. Tetapi, nilai atau ukuran dari komponen dalam simulasi dengan keadaan nyata sedikit berbeda. Hal ini disebabkan karena nilai atau ukuran komponen di pasaran sangat terbatas.

5. Pengujian Sistem dan Pengambilan Data

Setelah alat atau prototype selesai dirancang dan diimplementasikan, maka dapat dilakukan pengujian terhadap alat tersebut. Tetapi, dalam pengujian alat lebih baik diuji masing-masing bagian terlebih dahulu kemudian baru keseluruhan alat. Hasil dari pengujian kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi. Apabila hasilnya sudah sesuai maka dapat dilakukan pengambilan data. Akan tetapi, jika belum sesuai atau terjadi troubleshooting maka harus di betulkan terlebih dahulu, sehingga sesuai dengan hasil simulasi dan dapat diambil datanya.

6. Analisis Data

Data-data yang diperoleh dari hasil pengujian alat kemudian dianalisis. Parameter-parameter yang dianalisis adalah tegangan keluaran dan arus keluaran dari rangkaian AC-AC Converter. Selain itu, parameter yang dianalisis adalah rugi-rugi daya saat pensaklaran. Setelah analisis data selesai maka dapat ditarik kesimpulan dari penelitian TA ini.

7. Penulisan Buku Tugas Akhir

Setelah analisis data dan penarikan kesimpulan selesai dilakukan, maka dapat dilakukan penulisan laporan atau pembuatan buku Tugas Akhir sebagai hasil akhir dari penelitian Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan masing-masing bab diuraikan sebagai berikut:

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.
2. BAB 2 berisi teori penunjang yang membahas tentang *cycloconverter*, sinyal *swicthing*, motor induksi satu fasa, macam-macam motor induk satu fasa, dan karakteristik dari triac.
3. BAB 3 berisi tentang uraian penentuan parameter untuk setiap komponen yang akan diimplementasikan.
4. BAB 4 berisi tentang hasil pengujian dan analisis terhadap simulasi yang dilakukan.
5. BAB 5 berisi tentang kesimpulan dan saran terhadap penelitian yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

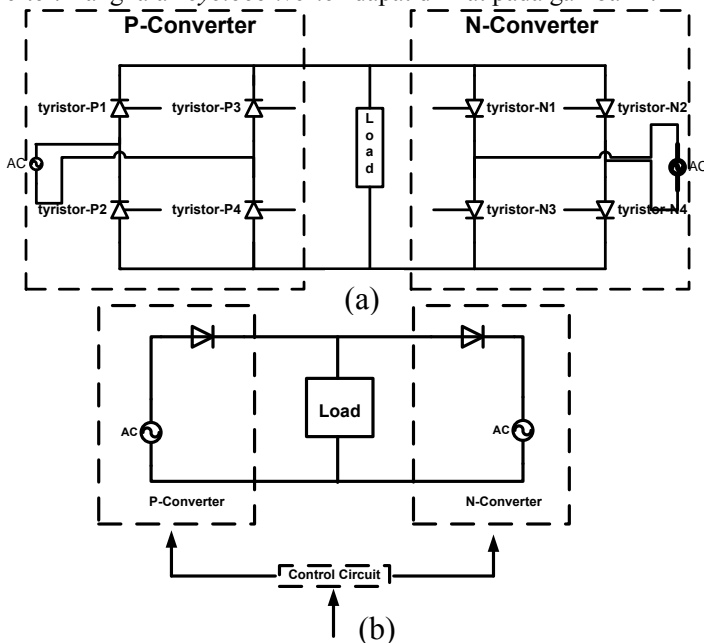
1. Dapat menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya tentang topologi rangkaian *cycloconverter* satu fasa.
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk Tugas Akhir.

BAB II

TRIAC SEBAGAI RANGKAIAN *SWITCH* PADA *CYCLOCONVERTER* DAN MOTOR INDUKSI SATU FASA SEBAGAI BEBAN *INDUKTIF*

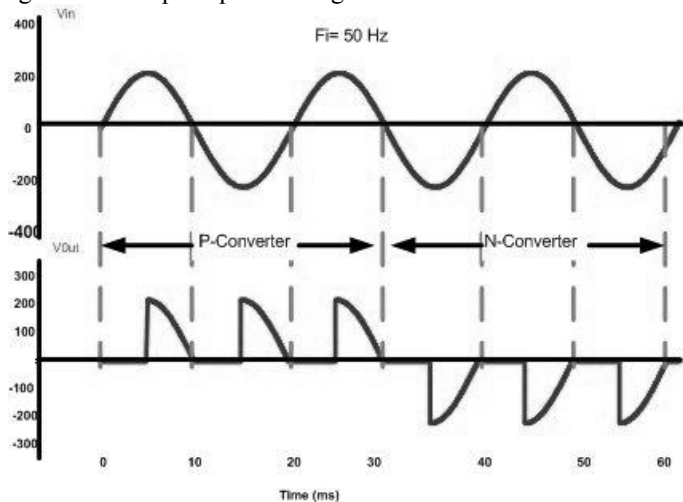
2.1 *Cycloconverter*

Cycloconverter adalah rangkaian elektronika yang dapat menghasilkan tegangan dan frekuensi keluaran AC yang lebih kecil dari tegangan dan frekuensi sumber. *Cycloconverter* terdiri dari beberapa *switch* (Triac, *thyristor*, ataupun Silicon Control Rectifier) yang disusun paralel dengan sumber. Besar tegangan maupun frekuensi keluaran dapat divariasikan dengan mengatur pensaklaran konverter. Rangkaian *cycloconverter* dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2.1 (a) Rangkaian *Cycloconverter* Satu Fasa (b) Rangkaian Ekuivalen pengganti *Cycloconverter*

Pada gambar 1(a) dapat dilihat rangkaian daya cycloconverter satu fasa. Untuk lebih mudah memahami kerja rangkaian ini sehingga dapat menurunkan frekuensi sumber adalah dengan cara membagi topologi ini menjadi 2 buah rangkaian konverter thyristor-P dan rangkaian konverter thyristor-N yang bekerja secara bergantian, seperti terlihat pada gambar 1(b). Konverter thyristor-P bekerja untuk membentuk tegangan keluaran pada saat periode positif-nya, sedangkan konverter thyristor-N bekerja setelahnya untuk membentuk tegangan keluaran pada periode negatif arus keluaran.



Gambar 2.2 Gelombang masukan dan keluaran *cycloconverter* dari 50 Hz ke 16,7 Hz dengan beban resistif.

Pada gambar 2.2 terlihat bahwa untuk mengubah sumber tegangan AC 50Hz menjadi frekuensi yang lebih rendah (16,67Hz), rangkaian konverter thyristor lengan kiri bekerja sedemikian rupa dengan memainkan sudut penyalanya selama 1,5 periode sumber. Konverter thyristor lengan kanan bekerja setelahnya.

2.2 Triac (*Bidirectional Thyristor*)

Triac merupakan gabungan dua thyristor yang terpasang antiparalel yang terintegrasi dalam satu komponen dengan terminal gate menjadi satu. Aplikasi praktis dari penggunaan Triac sebagai saklar elektronik pada umumnya sebagai pengaturan tegangan bolak-balik (AC), antara lain: VAR kompensator, saklar statis, soft starter

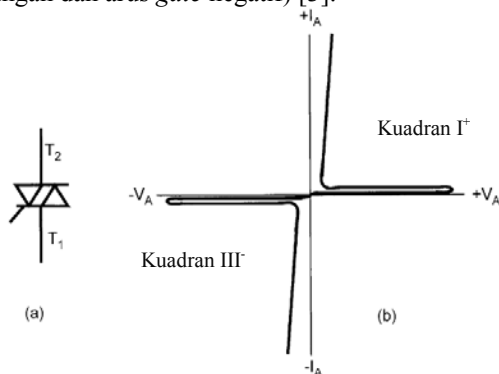
dan driver motor (Rashid, 2001:44). Karakteristik dan simbol dari Triac ditunjukkan pada Gambar 2.3.

Triac sering digunakan karena lebih ekonomis dan lebih mudah dalam pengontrolannya dibanding sepasang thyristor yang terpasang anti-paralel. Konstruksinya yang terintegrasi menimbulkan beberapa kekurangan. Kekurangan Triac jika dibandingkan thyristor antara lain sensitivitas arus gate Triac lebih buruk dan waktu pemadaman (turn-off time) lebih lama dan dengan alasan yang sama, nilai dv/dt lebih rendah sehingga sulit untuk diaplikasikan pada beban induktif.

Tabel 2.1 Rating Komponen yang Umum Disertakan[3].

Simbol	Keterangan
V_{tm} , V_{fm}	Penurunan tegangan maksimum pada kondisi nyala (pada kondisi antara persimpangan suhu dan arus maju)
I_{drm}	Maksimal kondisi arus <i>forward</i> pada saat <i>off-state</i> (pada kondisi antara persimpangan suhu dan tegangan maju)
I_{rrm}	Maksimal arus balik pada saat <i>off-state</i> (pada kondisi antara persimpangan suhu dan tegangan mundur)
dv/dt	Perubahan tegangan terhadap waktu
V_{gt}	Tegangan <i>gate</i>
V_{gd} , V_{gdm}	Maksimal tegangan pada saat tidak ada <i>gate</i>
I_{gt}	Maksimal arus <i>gate</i>
T_{gt} (GTO)	Maksimal waktu nyala
T_q	Maksimal waktu mati
t_D	Maksimal waktu tunda
$R(j-c)$	Resistansi <i>thermal junction-to-case</i> maksimal
$R(c-s)$	Resistansi <i>thermal case-to-sink</i> maksimal

Triac merupakan komponen dua arah, kerana itulah terminalnya tidak dapat disebut sebagai anoda maupun katoda. Sebagai gantinya, terminalnya disebut MT_1 dan MT_2 . Jika terminal MT_2 lebih positif terhadap terminal MT_1 , Triac dipicu dengan memberikan sinyal *gate* positif atau negatif. Bila MT_2 lebih negatif terhadap terminal MT_1 maka pemicuan dilakukan dengan memberikan sinyal pulsa negatif antara *gate* dan terminal MT_1 . Tanpa memperdulikan kedua polaritas sinyal *gate*, Triac dapat diaktifkan baik sinyal positif ataupun negatif. Dalam prakteknya, kepekaan bervariasi antara suatu kuadran dengan kuadran lainnya, Triac dioperasikan pada kuadran I^+ (tegangan dan arus *gate* positif) dan III^- (tegangan dan arus *gate* negatif) [3].



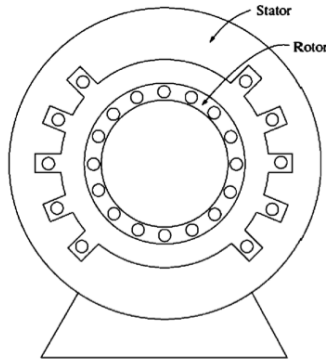
Gambar 2.3 Simbol dan karakteristik $v - i$ dari Triac [10].

2.3 Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor yang umum digunakan dalam dunia industri dan rumah tangga. Motor induksi sering digunakan karena motor induksi merupakan mesin yang ekonomis, handal, dan tersedia untuk berbagai aplikasi dan lingkungan kerja dengan jangkauan daya mulai dari beberapa watt sampai megawatt. Motor induksi multi fasa sering dijumpai dalam berbagai aplikasi berdaya besar sebagai penggerak utama seperti dijumpai di dunia industri sebagai pompa, kipas angin, kompresor dan lain-lain. Motor induksi sering pula digunakan secara luas pada peralatan rumah tangga sebagai kipas angin, mesin cuci, peralatan pertukangan dan lain-lain [10].

2.3.1 Prinsip Kerja

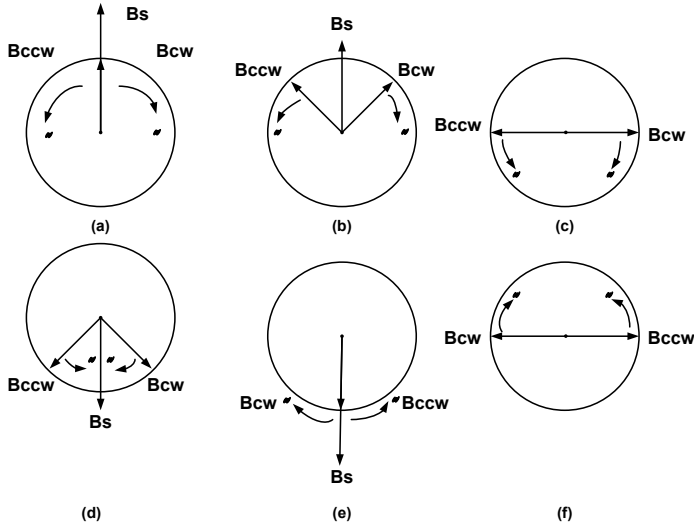
Motor induksi satu fasa hanya memiliki satu fasa di kumparan statornya, oleh karena itu medan magnet di motor induksi satu fasa tidak berputar, melainkan hanya bergerak-gerak dalam arah yang berlawanan atau dapat dikatakan *pulses* [6].



Gambar 2.4 Konfigurasi motor induksi satu fasa [6].

Dikarenakan medan magnet pada stator tidak berputar maka rotor pun tidak ikut berputar, sehingga tidak ada tegangan yang diinduksikan dan tidak ada arus yang mengalir pada motor, torsi pun tidak akan dihasilkan [6]. Terdapat teori yang menjelaskan proses timbulnya torsi ketika rotor telah berputar, yaitu adalah *Double-revolving-field theory* [6]. Teori ini menjelaskan bahwa permasalahan pada motor induksi satu fasa dapat diselesaikan dengan cara menambahkan satu lagi medan magnet yang bergerak dalam arah yang berlawanan dengan medan yang satunya lagi. Torsi yang dihasilkan adalah hasil pertambahan dari torsi yang dihasilkan oleh masing-masing medan magnet. Kerapatan flux dari medan magnet diperoleh dengan rumus:

$$B_s(t) = (B_{max}\cos\omega t)j \quad (2-1)$$



Gambar 2.5 Dua buah medan magnet yang bergerak dengan arah yang berlawanan [6]

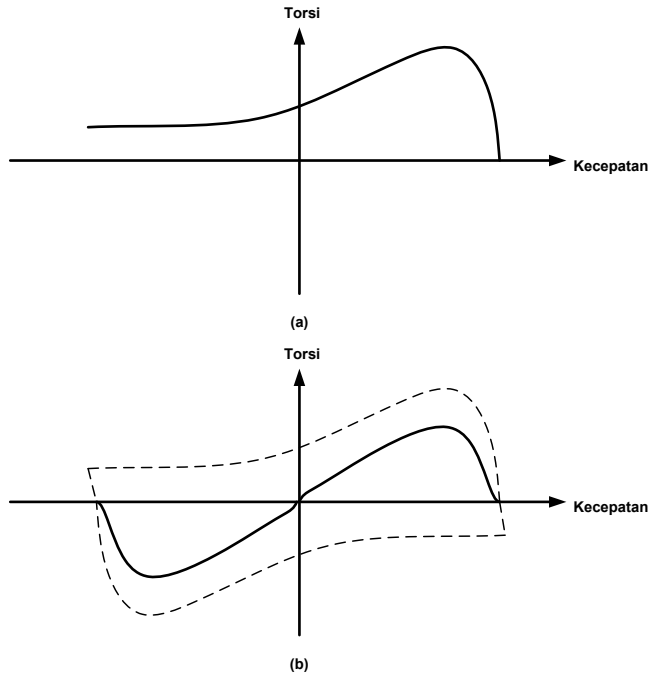
$$B_{CW}(t) = \left(\frac{1}{2}B_{max}\cos\omega t\right)i - \left(\frac{1}{2}B_{max}\sin\omega t\right>j \quad (2-2)$$

$$B_{CCW}(t) = \left(\frac{1}{2}B_{max}\cos\omega t\right)i + \left(\frac{1}{2}B_{max}\sin\omega t\right>j \quad (2-3)$$

Pertambahan dari medan magnet yang berputar searah jarum jam dan berlawanan arah dengan jarum jam adalah sama dengan medan pulsasi B_s .

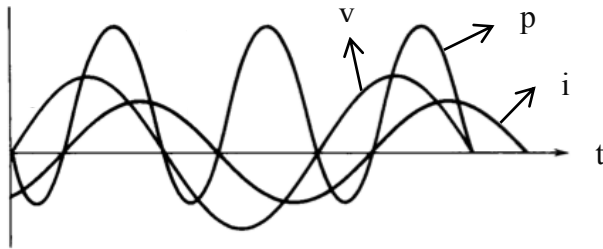
$$B_s(t) = B_{CW}(t) + B_{CCW}(t) \quad (2-4)$$

Kurva torsi-kecepatan dari motor induksi satu fasa adalah merupakan nilai superposisi dari kurva torsi-kecepatan motor induksi tiga fasa pada satu medan magnet yang berputar dan kurva kebalikannya.



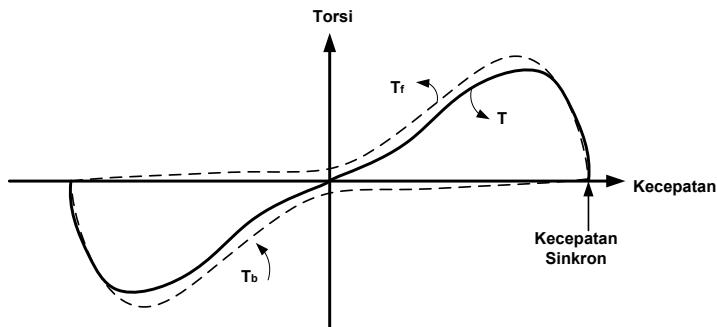
Gambar 2.6 (a) Kurva torsi-kecepatan pada motor induksi tiga fasa secara teori
(b) Kurva torsi-kecepatan dari dua medan magnet yang berlawanan [6]

Pada motor induksi satu fasa, daya yang dihasilkan oleh motor induksi berpulsasi pada frekuensi dua kali dari pada frekuensi sumber seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11, dalam 1 gelombang tegangan sumber terdapat 1 gunung dan 1 lembah, dimana pada gelombang daya sudah memiliki 2 gunung dan 2 lembah.



Gambar 2.7 Gelombang arus (i), tegangan (v), dan daya (p) pada motor induksi satu fasa [7]

Konsekuensinya, akan dihasilkan karakteristik torsi-kecepatan yang berbentuk seperti pada gambar 2.12.

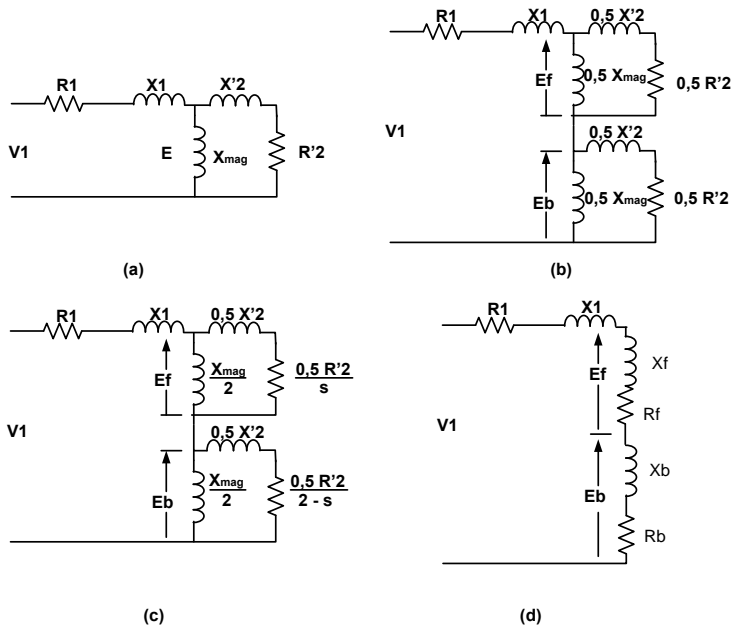


Gambar 2.8 Kurva Torsi-Kecepatan yang sebenarnya pada motor induksi satu fasa [7]

Torsi yang ditunjukkan pada gambar 2.8 merupakan kurva torsi pada kondisi nyata yang terjadi pada motor induksi satu fasa. Torsi pulsasi dihasilkan dari interaksi flux dan *magnetic-motive-force* (mmf) yang berlawanan, yang saling melewati satu sama lain pada dua kali kecepatan sinkron [7], misalkan interaksi antara *forward flux* dengan *backward* rotor mmf dan *backward flux* dengan *forward* rotor mmf. Torsi pulsasi menyebabkan motor induksi satu fasa bersuara lebih nyaring dibandingkan dengan motor induksi fasa banyak.

2.3.2 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Satu Fasa

Rangkaian stator pada motor induksi satu fasa terhubung pada sumber tegangan. Arus stator menghasilkan mmf yang ekuivalen dengan dua amplitude konstan pada gelombang mmf yang bergerak berputar saling berlawanan pada kecepatan sinkron. Setiap gelombang yang berputar ini menginduksikan arus pada rotor kemudian menghasilkan putaran. Proses ini sama dengan proses terjadinya putaran pada motor induksi fasa banyak [7].



Gambar 2.9 Rangkaian ekuivalen motor (a) dan (b) pada saat rotor diam (c) dan (d) pada saat rotor berputar [7]

Berdasarkan gambar di atas, notasinya adalah sebagai berikut:

- R_1 = Resistansi dari kumparan stator
- X_1 = Reaktansi bocor dari kumparan stator
- X_{mag} = Reaktansi magnetik
- X'_2 = Reaktansi bocor rotor dari referensi stator
- R'_2 = Resistansi rotor dari referensi stator
- V_1 = Sumber tegangan

E = Tegangan yang diinduksikan pada kumparan stator oleh gelombang *air gap flux* yang dihasilkan efek kombinasi arus stator dan rotor.

$$E = 4,44fN\Phi \quad (2-5)$$

Φ adalah *air gap flux*. Berdasarkan teori *double-revolving field* rangkaian ekuivalen dapat dipecah menjadi dua bagian *forward*, dan *backward* seperti pada gambar 2.9 b yang merepresentasikan masing-masing medan.

$$E_f = 4,44fN\Phi_f \quad (2-6)$$

$$E_b = 4,44fN\Phi_b \quad (2-7)$$

Pada saat kondisi diam, nilai $\Phi_f = \Phi_b$ sehingga $E_f = E_b$. Pada saat berputar dan bekerja hanya pada kumparan utama. Pada arah medan maju akan ada slip (s^+) dengan arus rotor yang diakibatkan oleh medan maju mempunyai frekuensi s.f, f adalah frekuensi stator. Arus rotor ini akan menghasilkan fluks yang bergerak maju pada kecepatan slip. Fluks ini akan membangkitkan ggl dengan arah maju pada kumparan utama stator. Pengaruh pada rotor jika dilihat dari sisi stator dapat dinyatakan sebagai suatu impedansi sebesar $0,5 R_2/s^+ + j 0,5X_2$ paralel dengan $0,5X_m$. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.13. Pada arah medan putar mundur, rotor tetap bergerak dengan slip s^+ berpatokan pada medan maju dan besarnya kecepatan putar medan maju adalah

$$n = 1 - s^+ \quad (2-8)$$

Kecepatan relatif motor dengan berpatokan pada medan mundur adalah $1 + n$, atau besarnya slip (s^-) terhadap medan mundur adalah

$$s^- = 1 + n \quad (2-9)$$

$$s^- = 2 - (1 - n) \quad (2-10)$$

$$s^- = 2 - s^+$$

Selanjutnya medan mundur menghasilkan arus rotor dengan frekuensi $(2 - s)f$. Arus rotor ini akan menghasilkan fluks yang bergerak mundur. Fluks ini akan menimbulkan ggl pada medan mundur kumparan stator. Pengaruh tersebut dapat diperlihatkan pada Gambar 2.13.

Dari rangkaian diatas dapat dihitung besar dari arus rotor, arus stator, daya masukan, dan faktor daya dengan sembarang nilai slip, apabila tegangan serta impedansi motor diketahui. Dari rangkaian ekivalen tersebut diperoleh :

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{\left(\frac{R'_{l2}}{s} + jX'_{l2}\right)jX_m}{\left(\frac{R'_{l2}}{s} + jX'_{l2}\right) + jX_m} \Omega \quad (2-12)$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{\left(\frac{R'_{l2}}{(2-s)} + jX'_{l2}\right)jX_m}{\left(\frac{R'_{l2}}{(2-s)} + jX'_{l2}\right) + jX_m} \Omega \quad (2-13)$$

Dimana :

R_1 = Resistansi kumparan stator (ohm)

R_2' = Resistansi kumparan rotor yang mengacu pada stator (ohm)

X_1 = Reaktansi bocor kumparan stator (ohm)

X_2' = Reaktansi bocor kumparan rotor yang mengacu pada stator (ohm)

X_m = Reaktansi pemagnetan (ohm)

Air gap power pada medan maju dan medan mundur adalah sebagai berikut

$$P_{gf} = I_1^2 R_f \quad (2-14)$$

$$P_{gb} = I_1^2 R_b \quad (2-15)$$

Torsi yang dihasilkan oleh tiap medan maju dan medan mundur adalah sebagai berikut

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega_{syn}} \quad (2-16)$$

$$T_b = \frac{P_{gb}}{\omega_{syn}} \quad (2-17)$$

Torsi resultannya adalah sebagai berikut

$$T = T_f - T_b = \frac{I_1^2}{\omega_{syn}} (R_f - R_b) \quad (2-18)$$

Daya mekanik yang terbentuk adalah sebagai berikut

$$P_{mech} = T \omega_m \quad (2-19)$$

$$= T \omega_{syn} (1 - s) \quad (2-20)$$

$$= I_1^2 (R_f - R_b) (1 - s) \quad (2-21)$$

$$= (P_{gf} - P_{gb}) (1 - s) \quad (2-22)$$

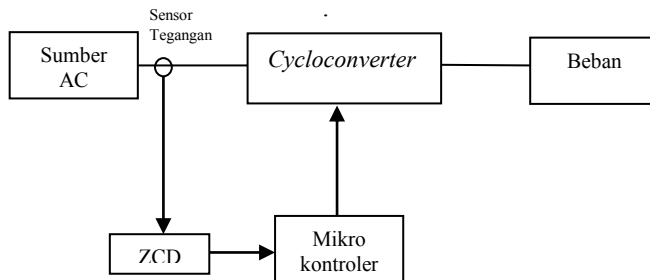
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB III

PERANCANGAN DAN SIMULASI CYCLOCONVERTER SATU FASA

3.1 Sistem Rangkaian *Cycloconverter* Satu Fasa

Sistem Rangkaian *Cycloconverter* Satu Fasa yang ditunjukkan pada gambar 3.1 merupakan gambaran sederhana sistem kelistrikan pada penelitian yang dilakukan. Gambaran ini berupa bagian pemodelan sumber AC, *Zero crossing detector* (ZCD), *Cycloconverter*, *Mikrokontroler*, dan Beban.



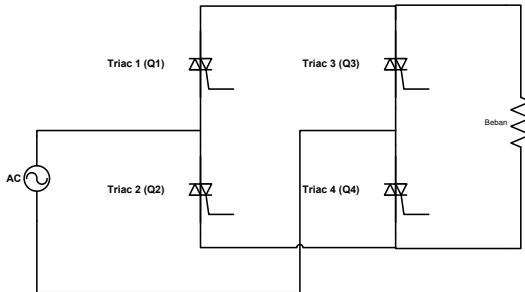
Gambar 3.1 Sistem Rangkaian *Cycloconverter* Satu Fasa

Pada penelitian ini sumber dari sistem menggunakan sumber satu fasa. Sumber satu fasa yang digunakan merupakan sumber AC dengan tegangan 220 volt dan frekuensi 50 Hz. Pada output sumber AC digunakan sebagai sinyal *referensi* ZCD yang akan digunakan untuk penentuan waktu intruksi oleh *mikrokontroler* terhadap *cycloconverter*.

Frekuensi output sumber satu fasa kemudian diturunkan oleh *cycloconverter* yang nilainya tergantung dari *Switching* yang diberikan. *Switching* dari converter ini diatur oleh mikrokontroler yang mana sinyal *Switching* dari kontrol ini dipengaruhi oleh *Zero Crossing Detector*. Dalam penelitian ini variasi frekuensi output dibatasi tiga *set point* yaitu $\frac{1}{2}$ frekuensi input, $\frac{1}{3}$ frekuensi input, dan $\frac{1}{4}$ frekuensi input. Ketika mikrokontroler diset $\frac{1}{2}$ frekuensi input maka mikro akan mengeluarkan sinyal *Switching* sehingga frekuensi keluaran yang dihasilkan setengah dari frekuensi input yang diberikan.

3.2 Pemodelan *Cycloconverter*

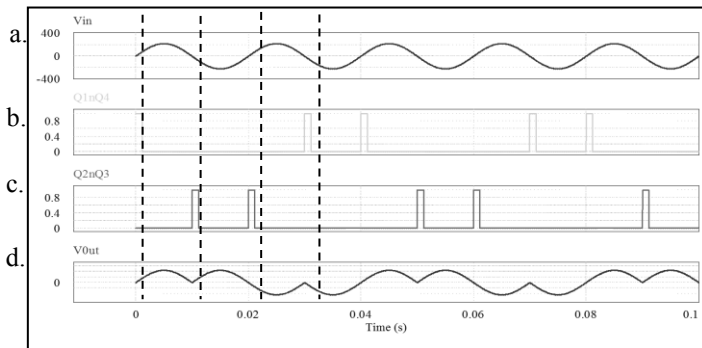
Pada tugas akhir ini, *cycloconverter* menggunakan Triac sebagai rangkaian *switch*-nya. Rangkaian *cycloconverter* terdiri dari 4 saklar dengan satu lengan keluaran yang terhubung langsung dengan beban. Empat komponen switching pada rangkaian berupa Triac. Empat Triac tersebut akan dikontrol dengan mikrokontroler.



Gambar 3.2 Rangkaian *Cycloconverter* Satu Fasa

3.2.1 Prinsip Kerja

Prinsip kerja dari *cycloconverter* dengan menggunakan Triac, untuk memperoleh frekuensi keluaran (f_o) setengah dari frekuensi input (f_i) dapat dilihat pada gambar berikut:



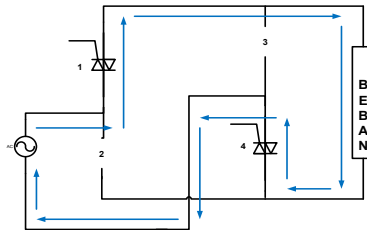
Gambar 3.3 Prinsip Kerja *Cycloconverter*

- (a) Sinyal input *cycloconverter*,
- (b) Sinyal *trigger* untuk *gate* 1 dan 4
- (c) Sinyal *trigger* untuk *gate* 2 dan 3

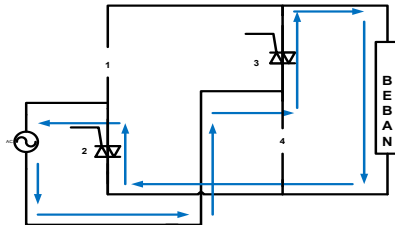
(d). Sinyal output *cycloconverter*

Gambar 3.3 dapat disimpulkan bahwa:

Untuk memperoleh setengah gelombang output yang pertama (polaritas output positif) maka gate 1 dan gate 4 akan menutup (konduksi) saat sumber AC berpolaritas positif. Sedangkan saat polaritas sumber AC negatif maka gate 2 dan gate 3 yang konduksi sesuai gambar 3.4 dan gambar 3.5.

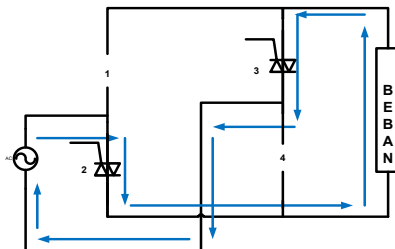


Gambar 3.4 Gate 1 dan gate 4 konduksi saat sumber AC positif

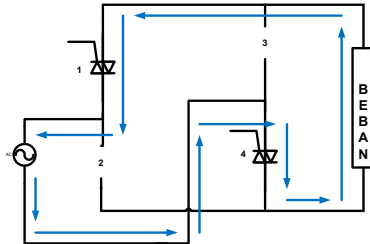


Gambar 3.5 Gate 2 dan gate 3 konduksi saat sumber AC negatif

Untuk memperoleh setengah gelombang output yang kedua (polaritas output negative) maka gate 2 dan gate 3 akan konduksi saat sumber AC positif. Sedangkan saat polaritas sumber AC negatif gate 1 dan gate 4 yang konduksi sesuai gambar 3.6 dan 3.7 berikut ini.



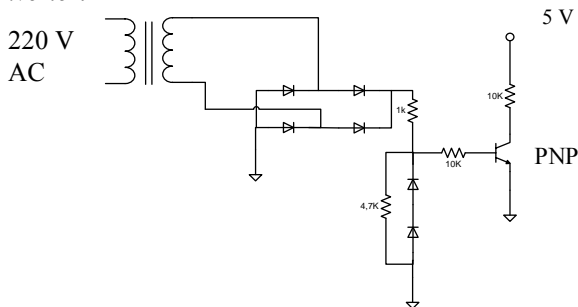
Gambar 3.6 Gate 2 dan gate 3 konduksi saat sumber AC positif



Gambar 3.7 Gate 1 dan gate 4 konduksi saat sumber AC negatif

3.3 Perancangan Sensor Tegangan dan *Zero Crossing Detector* (ZCD)

Rangkaian sensor tegangan menggunakan trafo step down sedangkan *zero crossing detector* pada tugas akhir ini menggunakan dioda (*full bridge*) dengan tujuan membaca dan mengubah gelombang sinus menjadi sinyal positif gelombang penuh, dimana sinyal tersebut akan dijadikan masukan untuk rangkaian *NOT*. Rangkaian *NOT* pada tugas akhir ini menggunakan resistor, dioda dan transistor PNP. Penggunaan rangkaian *NOT* ini bertujuan untuk menghasilkan sinyal *interuksi* yang akan dijadikan input *mikrokontroler* supaya *mikrokontroler* tersebut dapat mengintruksikan sinyal *switching* pada *cycloconverter*.

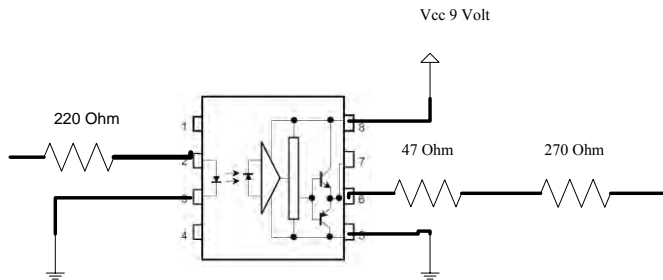


Gambar 3.8 Skema rangkaian Sensor Tegangan dan ZCD

3.4 Perancangan *Driver Triac*

Output mikrokontroler tidak bisa langsung digunakan untuk menyalakan (men-trigger) Triac secara langsung karena dikhawatirkan

arus yang mengalir pada Triac akan menuju ke mikrokontroler dan akan merusak mikrokontroler. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah rangkain driver yang digunakan untuk memisahkan rangkaian tegangan tinggi (sisi Triac) dengan rangkaian tegangan rendah (sisi mikrokontroler). Gambar 3.4 menunjukkan skema dari rangkain driver Triac.

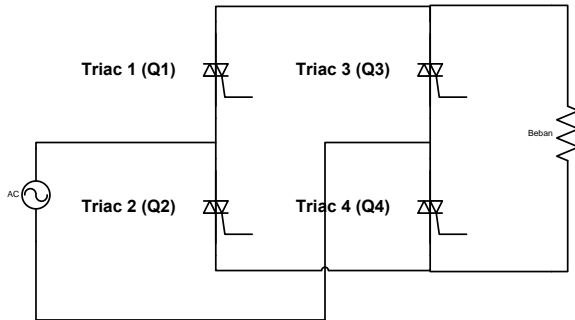


Gambar 3.9 Skema Rangkaian *Driver*

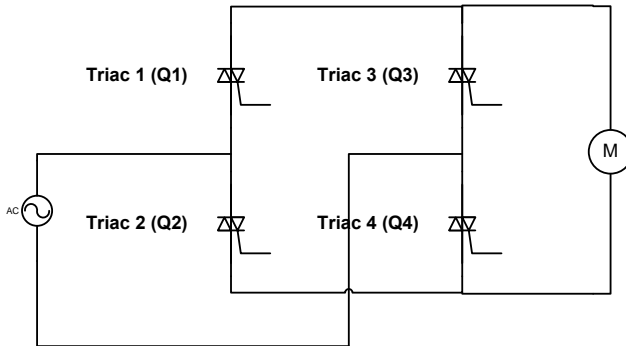
Prinsip kerja dari rangkaian driver diatas sebagai berikut, ketika mikrokontroler mengeluarkan sinyal switcing maka photo dioda akan menyala dan mengaktifkan photo transistor sehingga output driver akan bernilai high. Tegangan keluaran driver bernilai sama dengan Vcc yaitu 9 volt.

3.5 Simulasi *Cycloconverter* Satu Fasa

Dalam perencanaan dan pembuatan alat *cycloconverter* ini, terlebih dahulu disimulasikan rancangan dan hasil output dari alat yang akan dibuat. Simulasi pada tugas akhir ini menggunakan *software*. Berikut adalah skema rangkaian yang disusun pada *software*:

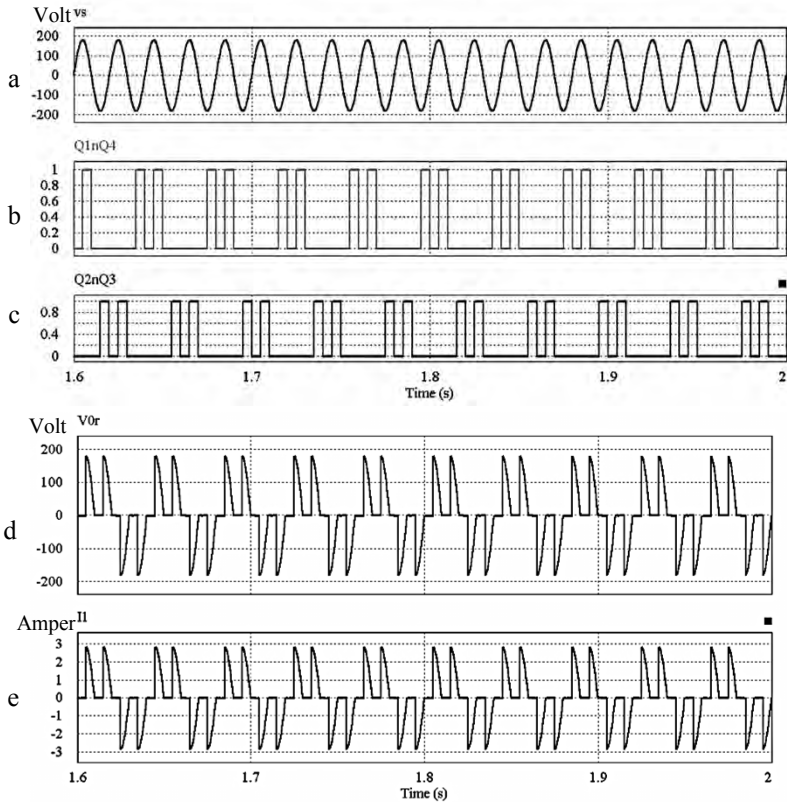


Gambar 3.10 Gambar rangkaian *cycloconverter* beban resistif



Gambar 3.11 Gambar rangkaian *cycloconverter* beban motor induksi

Pada rangkaian diatas digunakan komponen Triac 4 buah, sumber AC, beban resisitif 64 ohm dan beban motor induksi satu fasa 20Watt. Berikut adalah hasil simulasi *cycloconverter* untuk beban resistif dengan frekuensi output; 25 Hz, 16,7 Hz, dan 12,5 Hz:

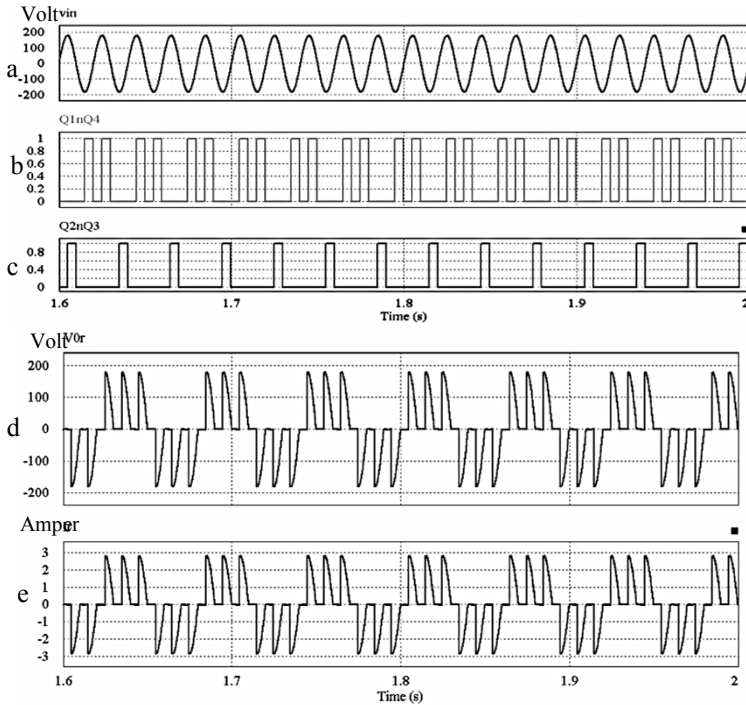


Gambar 3.12 Hasil simulasi untuk 25 Hz;

- Gelombang input dari *cycloconverter*;
- Sinyal *switching* Triac 1 dan Triac 4;
- Sinyal *switching* Triac 2 dan Triac 3;
- Gelombang tegangan output dari *cycloconverter*
- Gelombang arus output dari *cycloconverter*

Gambar 3.12 merupakan hasil simulasi *cycloconverter* dengan frekuensi *output* 25 Hz. Gambar 3.12.a menunjukkan gelombang *input* yang masuk ke *cycloconverter*. Gambar 3.12.b dan gambar 3.12.c merupakan sinyal *switching* yang diberikan agar frekuensi *output* dari *cycloconverter* 25 Hz. Sedangkan gambar 3.12.d

dan gambar 3.12.e merupakan gelombang *output* dari *cycloconverter* dengan frekuensi 25 Hz.

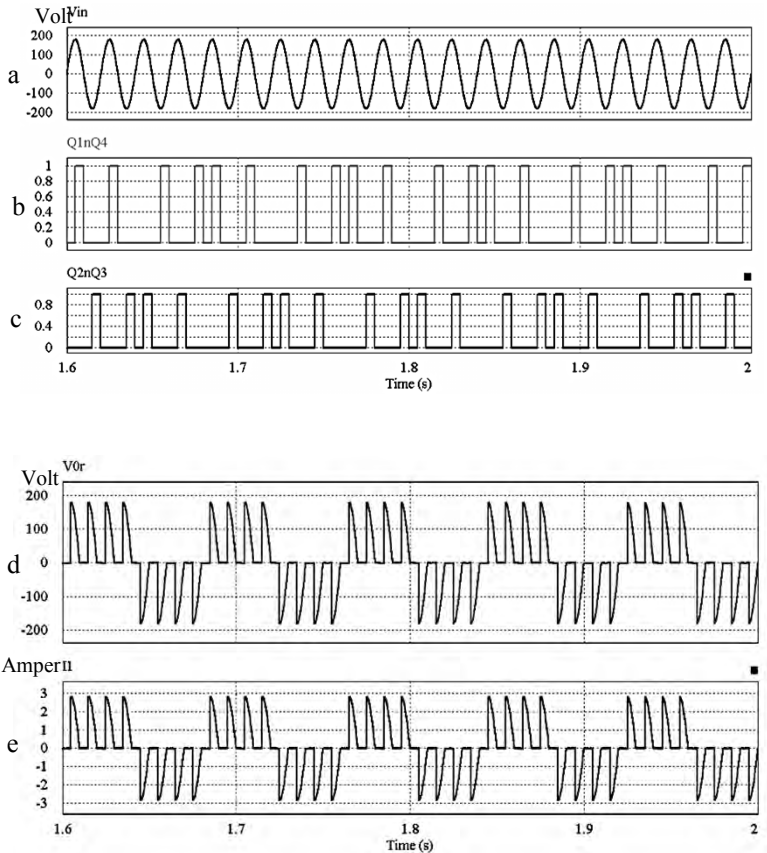


Gambar 3.13 Hasil simulasi untuk 16,7 Hz;

- Gelombang input *cycloconverter*
- Sinyal *switching* Triac 1 dan Triac 4
- Sinyal *switching* Triac 2 dan Triac 3
- Gelombang tegangan output dari *cycloconverter*
- Gelombang arus output dari *cycloconverter*

Gambar 3.13 merupakan hasil simulasi *cycloconverter* dengan ferkuensi *output* 16,7 Hz yang disimulasikan pada *software* PSIM. Gambar 3.13.a menunjukkan gelombang input yang masuk pada rankain *cycloconverter*. Gambar 3.13.b dan gambar 3.13.c merupakan sinyal *switching* yang diberikan pada rangkaian

cycloconverter sehingga menghasilkan frekuensi *output* 16,7 Hz. Sedangkan gambar 3.13.d merupakan tegangan *output* dengan frekuensi 16,7 Hz dan gambar 3.13.e merupakan arus *output* dengan frekuensi 16,7 Hz.



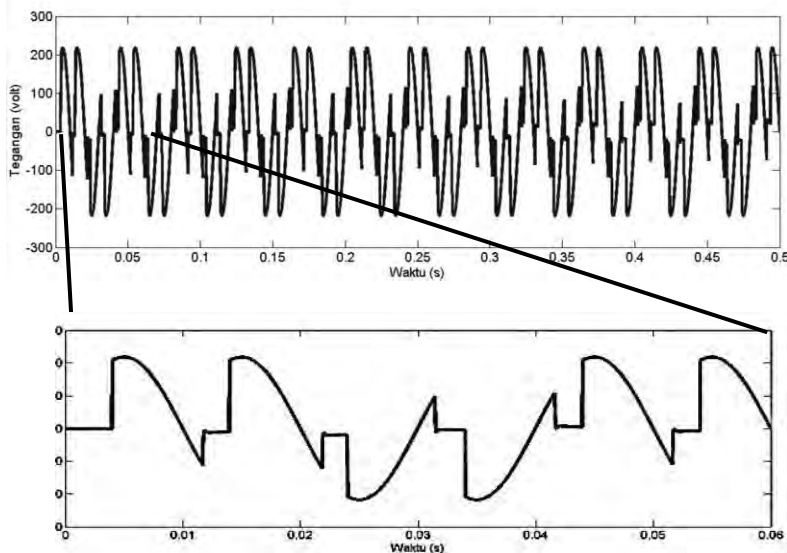
Gambar 3.114 Hasil simulasi untuk 12,5 Hz;

- Gelombang input *cycloconverter*
- Sinyal *switching* Triac 1 dan Triac 4
- Sinyal *switching* Triac 2 dan Triac 3
- Gelombang tegangan output *cycloconverter*
- Gelombang arus output *cycloconverter*

Gambar 3.14 merupakan hasil simulasi *cycloconverter* dengan frekuensi *output* 12,5 Hz yang disimulasikan pada *software* PSIM. Gambar 3.14.a menunjukkan gelombang input yang masuk pada rangkaian *cycloconverter*. Gambar 3.14.b dan gambar 3.14.c merupakan sinyal *switching* yang diberikan pada rangkaian *cycloconverter* sehingga menghasilkan frekuensi *output* 12,5 Hz. Sedangkan gambar 3.14.d merupakan tegangan *output* dengan frekuensi 12,5 Hz dan gambar 3.14.e merupakan arus *output* dengan frekuensi 12,5 Hz.

3.5.1 Simulasi *Cycloconverter* Satu Fasa Beban Motor

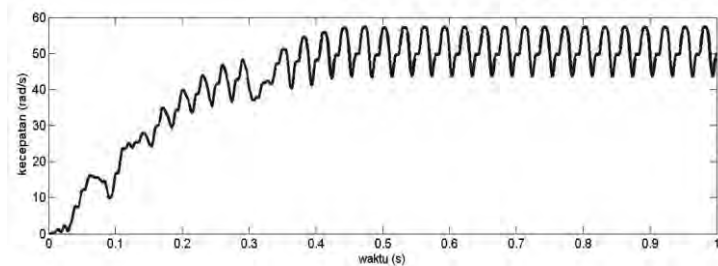
Hasil simulasi *cycloconverter* untuk beban motor induksi satu fasa dengan frekuensi *output*; 25 Hz, 16,7 Hz, dan 12,5 Hz, sebagai berikut:



Gambar 3.15 Hasil simulasi tegangan pada motor induksi untuk frekuensi *output* 25 Hz

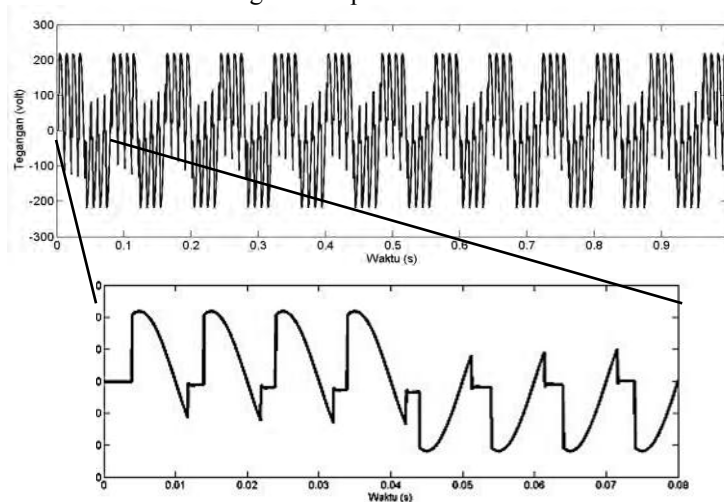
Gambar 3.15 diatas menunjukkan tegangan *output* *cycloconverter* ketika diberi beban motor induksi (beban induktif), dari gambar dapat kita lihat tegangan yang mengalami *overlapping* hal ini disebabkan arus yang masih lewat meskipun tegangan sudah

Gambar 3.17 diatas menunjukkan tegangan *output cycloconverter* ketika diberi beban motor induksi (beban induktif), dari gambar dapat kita lihat adanya tegangan yang mengalami *overlapping* hal ini disebabkan adanya arus yang masih lewat meskipun tengangan sudah mencapai nilai nol.



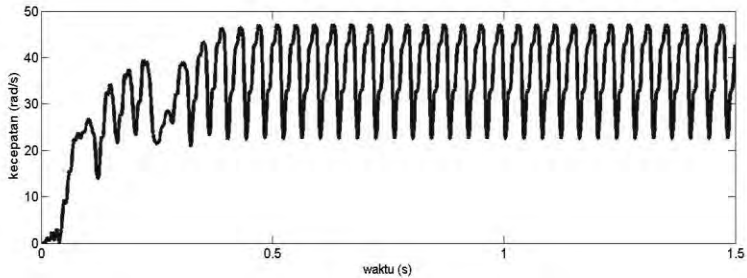
Gambar 3.18 Hasil simulasi kecepatan motor induksi untuk frekuensi output 16,7 Hz

Gambar 3.18 merupakan hasil simulasi kecepatan motor induksi saat frekuensi *output cycloconverter* 16,7 Hz. Dari gambar tersebut diperoleh kecepatan putar rata-rata dari motor induksi sebesar 50 rad/s atau sama dengan 500 rpm.



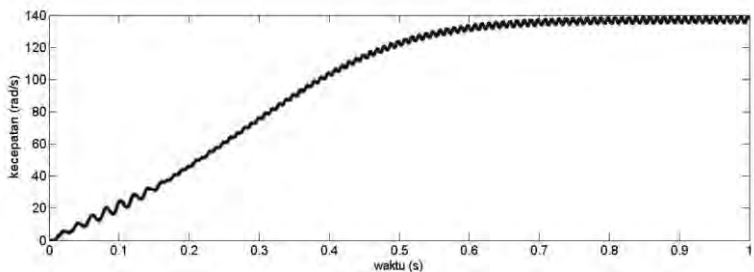
Gambar 3.19 Hasil simulasi tegangan pada motor induksi untuk frekuensi output 12,5 Hz

Gambar 3.19 menunjukkan tegangan *output cycloconverter* ketika diberi beban motor induksi (beban induktif), dari gambar dapat kita lihat adanya tegangan yang mengalami *overlapping* hal ini disebabkan adanya arus yang masih lewat meskipun tegangan sudah mencapai nilai nol. Oleh karena itu, dibutuhkan penentuan sudut penyalan untuk Triac agar tidak terjadi hubung singkat antara Triac satu dengan yang lainnya.



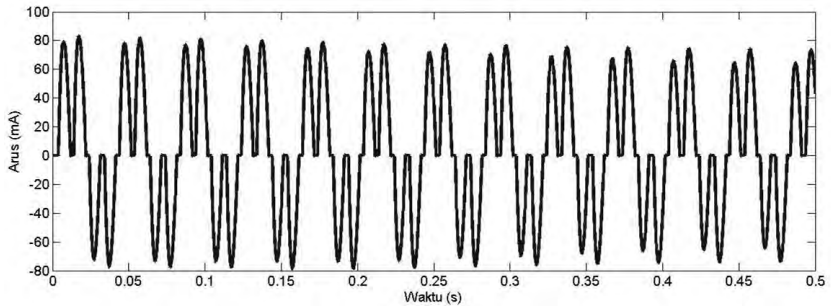
Gambar 3.20 Hasil simulasi kecepatan motor induksi untuk frekuensi output 12,5 Hz

Gambar 3.20 merupakan hasil simulasi kecepatan motor induksi saat frekuensi *output cycloconverter* 12,5 Hz. Dari gambar tersebut didapat kecepatan putar rata-rata dari motor induksi sebesar 37 rad/s atau sama dengan 370 rpm. Sedangkan saat motor induksi dioperasikan DOL kecepatan putar motor induksi sebesar 140 rad/s atau sama dengan 1400 rpm.



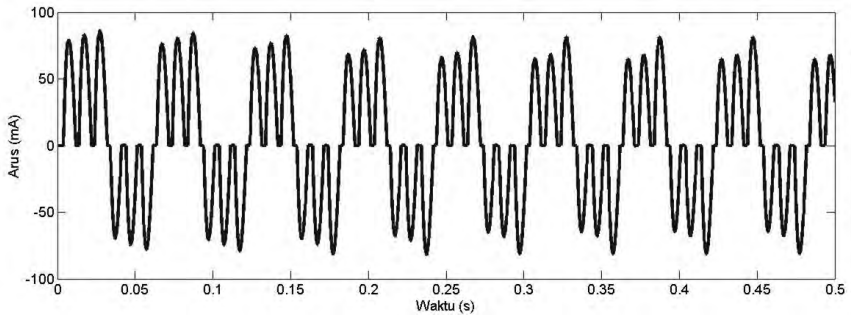
Gambar 3.21 Hasil simulasi kecepatan motor induksi saat dioperasikan secara DOL

Berikut merupakan gambar hasil simulasi arus keluaran *cycloconverter* ketika beban berupa motor induksi satu fasa.



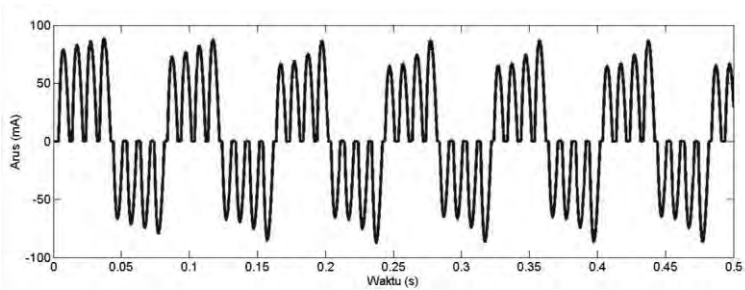
Gambar 3.22 Hasil Simulasi Arus Keluaran Saat Frekuensi Keluaran 25 Hz.

Gambar 3.22 merupakan hasil simulasi arus keluaran *cycloconverter* saat berbeban motor induksi satu fasa. Dari hasil simulasi, arus keluaran yang terukur (Arus rms) bernilai 56,58 mA.



Gambar 3.23 Hasil Simulasi Arus Keluaran Saat Frekuensi Keluaran 16,7 Hz.

Gambar 3.23 merupakan hasil simulasi arus keluaran *cycloconverter* saat berbeban motor induksi satu fasa. Dari hasil simulasi, arus keluaran yang terukur (Arus rms) bernilai 55,3 mA.



Gambar 3.24 Hasil Simulasi Arus Keluaran Saat Frekuensi Keluaran 12,5 Hz.

Gambar 3.24 merupakan hasil simulasi arus keluaran *cycloconverter* saat berbeban motor induksi satu fasa. Dari hasil simulasi, arus keluaran yang terukur (Arus rms) bernilai 52,97 mA.

3.6 Penentuan Sudut Penyalaan (α)

Ketika *cycloconverter* dibebani oleh motor induksi maka arus akan tertinggal terhadap tegangan (*lagging*) sesuai gambar (3.5). Yang menyebabkan terjadi hubung singkat antara Triac 1 dengan Triac yang lainnya jika sudut penyalannya sama dengan 0. Oleh karena itu, diperlukan penentuan besar sudut penyalan dari sebuah Triac yang mana Triac tersebut merupakan saklar elektronik yang digunakan pada rangkain *cycloconverter*. Besar sudut penyalan tergantung pada $\cos \theta$ dari motor induksi yang digunakan.

Sesuai hasil pengamatan langsung menggunakan osiloskop pada motor induksi satu fasa yang digunakan pada tugas akhir ini $\cos \phi$ yang didapat sebesar 0,53, maka:

$$\alpha = \cos^{-1} \theta \quad (3.1)$$

$$\alpha = \cos^{-1} 0.53 \quad (3.2)$$

$$\alpha = 45^{\circ} \quad (3.3)$$

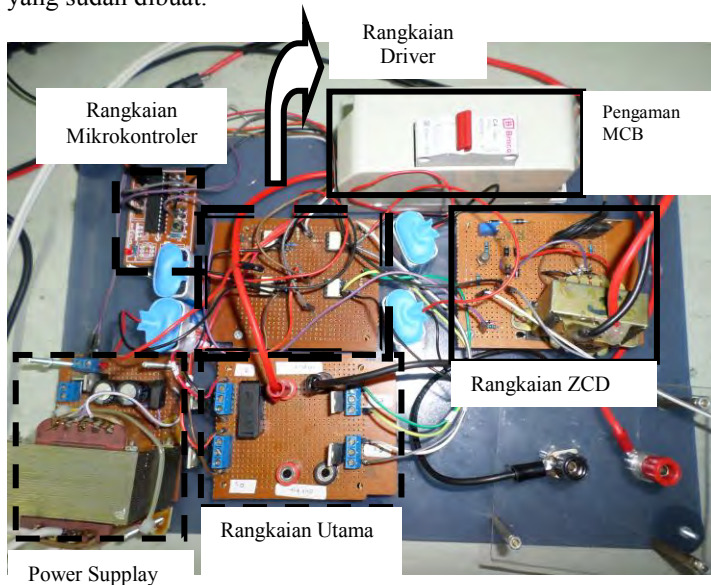
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB IV

IMPLEMENTASI, PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA HASIL KELUARAN *CYCLOCONVERTER* SATU FASA

4.1 Implementasi *Cycloconverter*

Dari hasil simulasi dan perhitungan maka diperoleh parameter-parameter komponen yang dibutuhkan untuk implementasi *Cycloconverter*. Gambar 4.1 menunjukkan rangkaian *Cycloconverter* yang sudah dibuat.

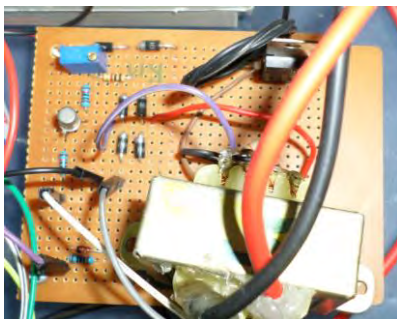


Gambar 4.1 Cycloconverter Berbasis Mikrokontroller

Gambar 4.1 merupakan gambar hasil dari implementasi *Cycloconverter* berbasis mikrokontroller dengan empat triac. Mikrokontroller dalam rangkaian diatas menggunakan ATMEGA8. Rangkaian *zero crossing detector* dalam tugas akhir ini menggunakan trafo *step down*, dioda, resistor dan resistor PNP. Untuk rangkaian *driver* yang dipakai menggunakan TLP250.

4.1.1 Implementasi Sensor Tegangan dan Zero Crossing Detector (ZCD)

Implementasi dari sensor tegangan dan *Zero Crossing Detector* yang sudah dirancang pada gambar 3.4 sudah dibuat seperti gambar 4.2. Rangkaian ini terdiri dari trafo ORIENT 350mA; diode; resistor bernilai ; dan sebuah transistor PNP.

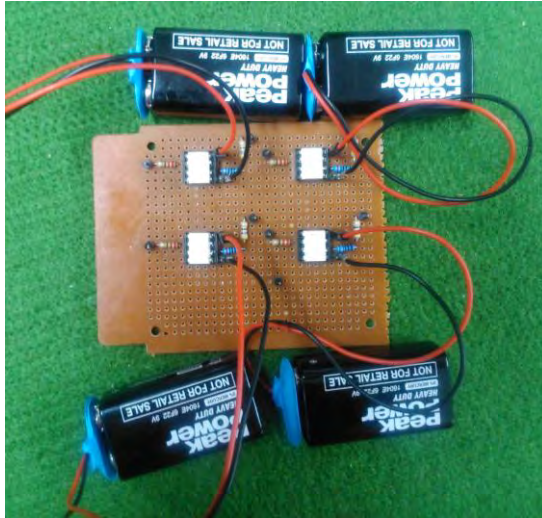


Gambar 4.2 Rangkaian Sensor Tegangan dan ZCD

Trafo pada gambar 4.2 berfungsi sebagai sensor tegangan dengan tegangan masukan 220 V AC dan tegangan keluaran 12 V AC. Tegangan 12 V AC tersebut kemudian dilewatkan *rectifier fullbridge* sehingga terbentuk gelombang penuh DC yang mana gelombang tersebut digunakan sebagai *gate* untuk mengaktifkan transistor PNP. Kerena rangkaian yang dibentuk oleh transistor dan resistor merupakan rangkaian gerbang NOT. Ketika *output rectifier fullbridge* bernilai lebih dari nol volt maka keluaran ZCD bernilai nol. Sedangkan ketika keluaran *rectifier fullbridge* bernilai nol volt maka keluaran ZCD bernilai satu. Keluaran pulsa ZCD digunakan untuk referensi mikrokontroller untuk membangkitkan sinyal digital yang digunakan untuk mengaktifkan *cycloconverter*.

4.1.2 Implementasi *Driver Triac*

Implementasi dari *driver triac* dapat dilihat pada gambar 4.3 dibawah ini. Pada rangkaian ini digunakan sebuah *optocoupler* TLP250, resistor 220 ohm, 47 ohm, 270 ohm, dan sebuah baterai 9 volt.

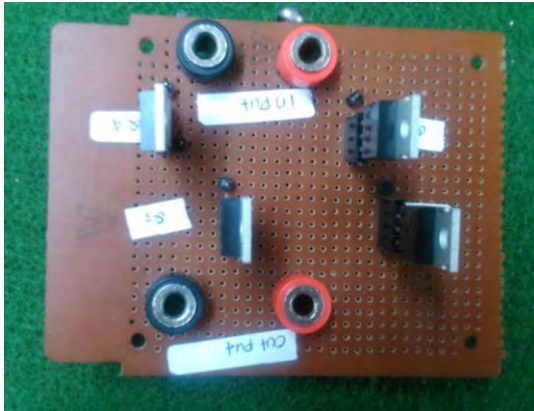


Gambar 4.3 Rangkaian *Driver Triac*

Resistor 220 ohm digunakan untuk membatasi arus yang masuk ke TLP250, TLP20 digunakan untuk memisahkan rangkaian tegangan tinggi dengan rangkain tegangan rendah. Sedangkan baterai 9 v digunakan untuk menentukan besar tegangan *output* dari *driver*. Untuk men- *trigger* triac dibutuhkan sebuah arus (I_{gate}) kurang dari 35mA oleh karena itu dibutuhkan sebuah resistor (47 ohm dan 270 ohm) untuk membatasi arus yang masuk ke triac.

4.1.3 Implementasi Rangkaian *Cycloconverter*

Rangkaian *cycloconverter* tersusun atas 4 triac tiap fasanya yang tersusun seperti gambar 3.2. Pada tugas akhir ini digunakan triac BT139 dengan tegangan *off state* maksimal 600 volt dan RMS *on-state current* sebesar 16 A. Implementasi dari rangkaian *cycloconverter* dapat dilihat pada gambar 4.4.



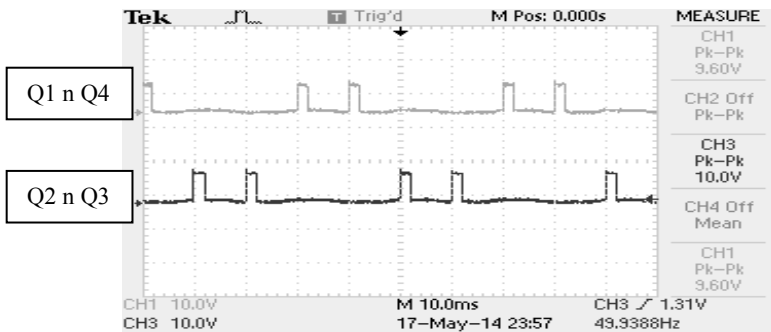
Gambar 4.4 Rangkaian *Cycloconverter*

4.2 Pengujian Sinyal *Switching Cycloconverter*

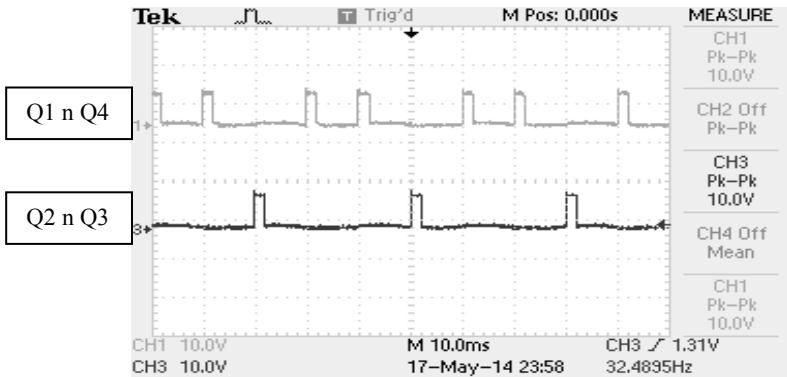
Pada tugas akhir ini rangkaian *cycloconverter* menggunakan dua belas triac. Sinyal *switching* digunakan untuk menentukan triac mana saja yang menyala sehingga menghasilkan frekuensi *output* yang diinginkan.

4.2.1 Pengujian Sinyal *Switching* Hasil Mikrokontroller

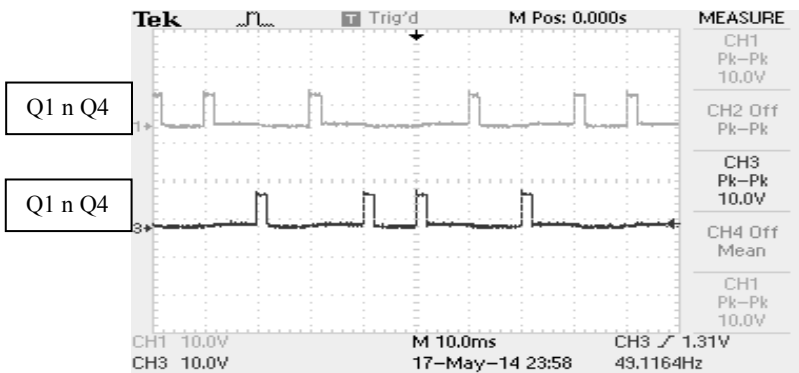
Sinyal *switching* dihasilkan oleh ATMEGA8 seperti gambar 4.2. Pengujian sinyal *switching* dilakukan menggunakan *oscilloscope*.



(a)



(b)



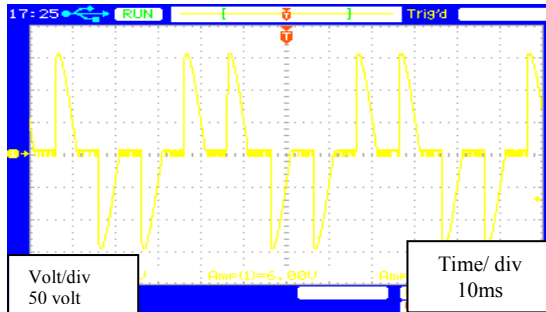
(c)

Gambar 4.5 Sinyal *Switching* Hasil Mikrokontroler

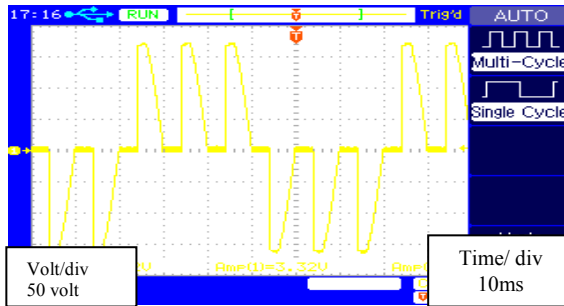
- Sinyal *Switching* Untuk Frekuensi *Output* 25 Hz
- Sinyal *Switching* Untuk Frekuensi *Output* 16,7 Hz
- Sinyal *Switching* untuk Frekuensi *Output* 12,5 Hz

4.2.2 Pengujian *Output Cycloconverter*

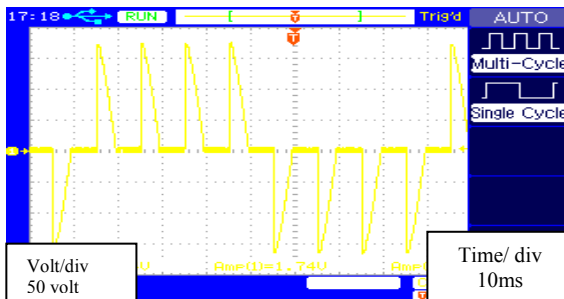
Pada tugas akhir ini *cycloconverter* disusun atas dua belas triac dengan variasi frekuensi output; 25 Hz, 16,7 Hz dan 12,5 Hz. Hasil pengujian output dari *cycloconverter* dapat dilihat pada gambar 4.6.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.6 Hasil Output Cycloconverter Beban Resistif

- Output Cycloconverter dengan Frekuensi 25 Hz
- Output Cycloconverter dengan Frekuensi 16,7 Hz
- Output Cycloconverter dengan Frekuensi 12,5 Hz

4.2.3 Pengujian *Cycloconverter* Beban Resistif dengan Tegangan *Input* Berbeda-beda

Paada pengujian ini, beban resistif bernilai 64 ohm. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1.1 Pengujian beban rasistif untuk frekuensi 25 Hz

Vin (V)	Hasil simulasi		Hasil Pengujian		Error V (%)	Error I (%)
	V out rms(V)	I out rms (mA)	V out rms (V)	I out rms (mA)		
60	30,57	0,478	27,83	0,452	8,96	5,44
100	50,95	0,796	51,54	0,82	1,25	3,02
140	71,32	1,114	71,67	1,132	0,49	1,62
180	91,7	1,433	89,65	1,34	2,24	6,5
220	112,08	1,751	112,23	1,782	0,14	1,77

Dari tabel 4.1.1 menunjukkan pengujian beban resistif untuk frekuensi 25 Hz. Dari hasil pengujian data tersebut terdapat perbedaan antara tegangan *output* simulasi dengan tegangan output hasil pengujian. Hal ini, disebabkan karena waktu pengukuran nilai dari tegangan yang diukur mengalami perubahan akibat dari frekuensi *input cycloconverter* yang berubah-ubah.

Tabel 4.1.2 Pengujian beban resistif untuk frekuensi 16,7 Hz

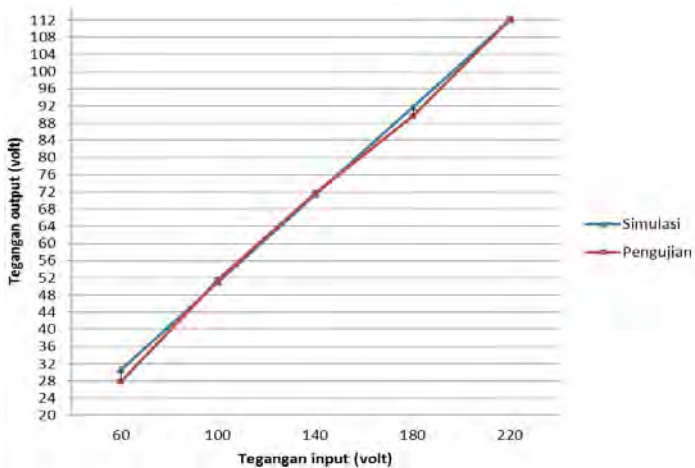
Vin (V)	Hasil simulasi		Hasil Pengujian		Error V (%)	Error I (%)
	V out rms(V)	I out rms(mA)	V out rms(V)	I out rms(mA)		
60	30,59	0,478	29,89	0,456	2,288	4,6
100	50,99	0,797	51,21	0,756	0,431	5,144
140	71,39	1,115	71,89	1,122	0,7	0,627
180	91,7	1,434	89,95	1,429	1,908	0,349
220	112,18	1,752	112,34	1,734	0,143	1,024

Tabel 4.1.2 menunjukkan pengujian beban resistif untuk frekuensi 16,7 Hz. Dari tabel tersebut dapat kita ketahui terdapat beberapa error tegangan dan error arus yang cukup besar. Hal ini, terjadi akibat dari harmonisa yang timbul pada tegangan dan arus output dari *cycloconverter*.

Tabel 4.1.3 Pengujian beban resistif untuk frekuensi 12,5

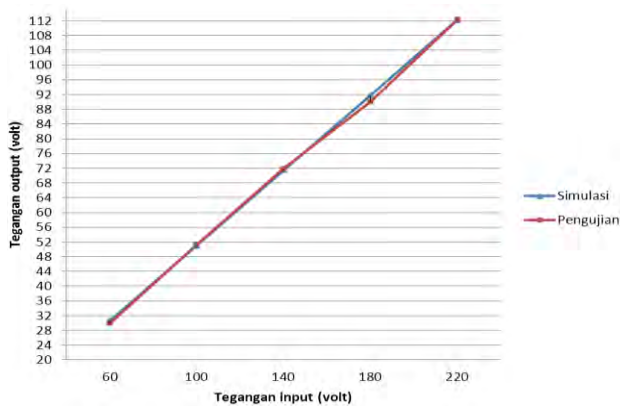
Vin (V)	Hasil simulasi		Hasil Pengujian		Error V (%)	Error I (%)
	V out rms(V)	I out rms(mA)	V out rms (V)	I out rms(mA)		
60	29,97	0,468	30,55	0,487	1,935	4,060
100	49,95	0,781	48,99	0,768	1,922	1,665
140	69,94	1,09	70,39	0,979	0,643	10,183
180	89,92	1,405	90,78	1,389	0,956	1,139
220	109,9	1,717	110,5	1,687	0,546	1,747

Tabel 4.1.3 merupakan tabel perbandingan antara hasil simulasi dengan hasil pengujian alat yang sudah dilakukan. Dari tabel 4.1 dapat dinyatakan dalam bentuk grafik pada gambar 4.7 berikut:



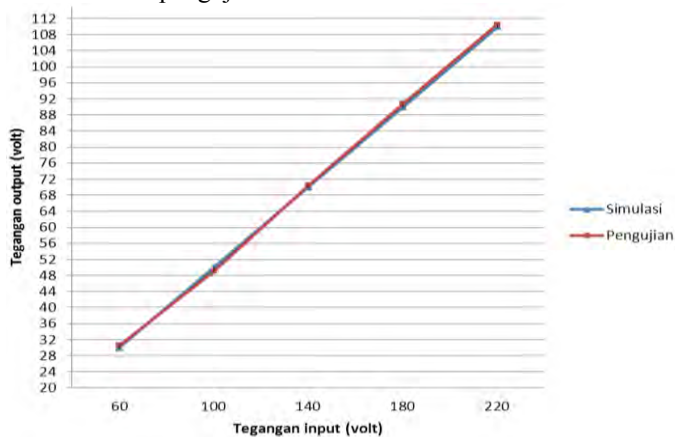
Gambar 4.7 Grafik tegangan *output* dan tegangan *input* cycloconverter 25 Hz.

Dari gambar 4.7 dapat disimpulkan bahwa tegangan input dan tegangan output saat simulasi dengan hasil pengujian sudah hampir sama.



Gambar 4.8 Grafik tegangan *output* dan tegangan *input* *cycloconverter* 16,7 Hz

Gambar 4.8 menyatakan perbandingan antara tegangan output saat simulasi dan saat pengujian dengan tegangan input. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan tegangan output *cycloconverter* saat simulasi dan saat pengujian sudah sama.



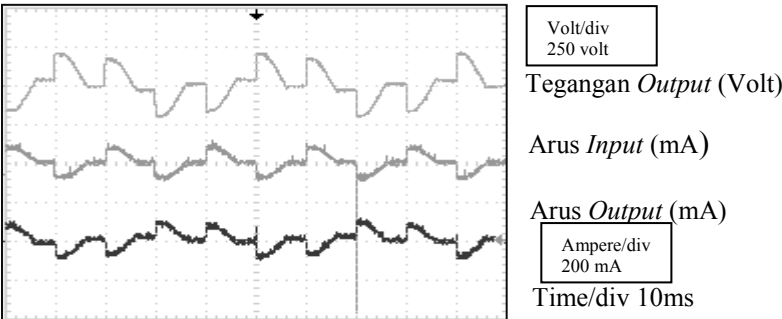
Gambar 4.9 Grafik tegangan *output* dan tegangan *input* *cycloconverter* 12,5 Hz

Gambar 4.9 menyatakan perbandingan antara tegangan output *cycloconverter* saat simulasi dengan tegangan output *cycloconverter* saat pengujian. Dari grafik tersebut dapat kita lihat bahwa tegangan

hasil simulasi jika dibandingkan dengan tegangan hasil pengujian hampir sama.

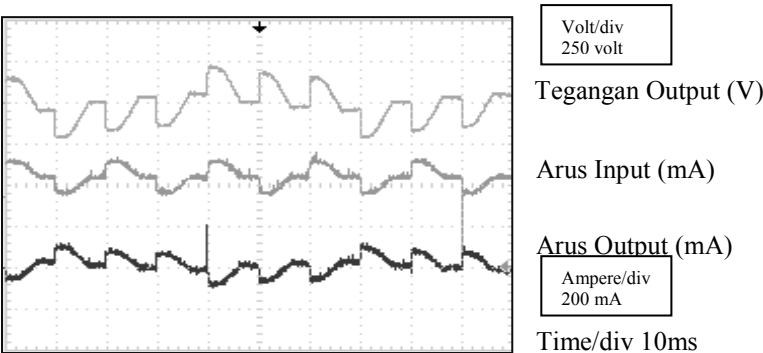
4.2.4 Pengujian Arus Input dan Arus Output saat Berbeban Resistif

Pada pengujian ini, arus input, arus output dan tegangan output dari cycloconverter yang sudah dibuat. Hasil dari pengujian ini akan ditampilkan pada gambar 4.7 sebagai berikut:



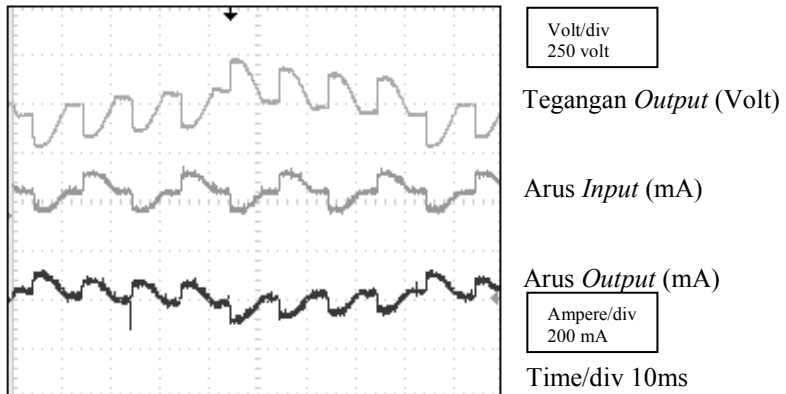
Gambar 4.10 Tegangan *Output*, arus *input* dan arus *output* pada frekuensi 25 Hz

Pada gambar 4.10 diatas merupakan hasil arus input dan arus output cycloconverter untuk frekuensi keluaran sebesar 25 Hz.



Gambar 4.11 Tegangan *Output*, arus *input* dan arus *output* pada frekuensi 16,7 Hz

Pada gambar 4.11 diatas merupakan hasil arus input dan arus output cycloconverter untuk frekuensi keluaran 16,7 Hz.



Gambar 4.12 Tegangan Output, arus input dan arus output pada frekuensi 12,5 Hz

Pada gambar 4.12 diatas merupakan hasil arus input dan arus output cycloconverter untuk frekuensi keluaran 12,5 Hz.

4.3 Analisis Data Pengujian Cycloconverter

4.3.1 Analisis Pengujian Sinyal *Switching Cycloconverter*

Dari hasil pengujian sinyal *switching* pada gambar 4.2 jika dibandingkan dengan hasil simulasi seperti pada gambar 3.8 dapat disimpulkan bahwa sinyal keluaran dari mikrokontroller yang sudah dibuat sesuai dengan hasil simulasi. Pada gambar 4.2 dapat dilihat tegangan puncak dari sinyal *switching* bernilai 10 volt. Sedangkan, untuk menghidupkan triac dibutuhkan arus gate sebesar < 35 mA oleh karena itu dibutuhkan sebuah resistor. Pada rangkain driver Triac yang sudah diimplementasikan resistor yang digunakan bernilai 317 ohm hasil seri dari 47 ohm dengan 270 ohm.

4.3.2 Analisis Hasil Pengujian Output Cycloconverter Beban Resistif

Dari hasil pengujian output cycloconverter beban resistif pada gambar 4.6 jika dibandingkan dengan hasil simulasi 3.8 dapat disimpulkan bahwa output dari cycloconverter yang sudah dibuat sudah sesuai dengan hasil simulasi. Beban resistif dalam pengujian cycloconverter ini berupa lampu resistif yang bernilai 64 ohm.

4.3.3 Analisis Hasil Pengujian Cycloconverter Beban Motor

4.3.3.1 Analisis Hasil Pengujian Kecepatan Motor Induksi

Hasil pengujian *cycloconverter* dengan frekuensi *output* 25 hz ketika diberi beban motor induksi satu fasa dapat ditunjukkan pada gambar 4.13 Berikut ini:



Gambar 4.13 Hasil Pengukuran Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa saat Frekuensi Output *Cycloconverter* 25 Hz

Gambar 4.13 menunjukkan hasil pengukuran kecepatan motor induksi satu fasa menggunakan *tacometer*. Pada pengujian tersebut diperoleh kecepatan motor induksi satu fasa sebesar 591,7 rpm. Jika dibandingkan dengan hasil simulasi pada gambar 3.17 maka terdapat perbedaan kecepatan motor induksi sebesar 108,3 rpm. Hal ini disebabkan karena rangkaian *cycloconverter* yang sudah dibuat belum mampu dioperasikan pada tegangan rating motor induksi (220Volts).

Hasil pengujian *cycloconverter* dengan frekuensi *output* 16,7 hz ketika diberi beban motor induksi satu fasa dapat ditunjukkan pada gambar 4.14 Berikut ini:



Gambar 4.14 Hasil Pengukuran Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa saat Frekuensi Output *Cycloconverter* 16,7 Hz

Gambar 4.14 menunjukkan hasil pengukuran kecepatan motor induksi satu fasa menggunakan *tachometer*. Pada pengujian tersebut diperoleh kecepatan motor induksi satu fasa sebesar 371,7 rpm. Jika dibandingkan dengan hasil simulasi pada gambar 3.18 maka terdapat perbedaan kecepatan motor induksi sebesar 128,3 rpm. Hal ini disebabkan karena rangkaian *cycloconverter* yang sudah dibuat belum mampu di operasikan pada tegangan rating motor induksi (220Volts). Hasil pengujian *cycloconverter* dengan frekuensi *output* 12,5 hz ketika diberi beban motor induksi satu fasa dapat ditunjukkan pada gambar 4.15 Berikut ini:

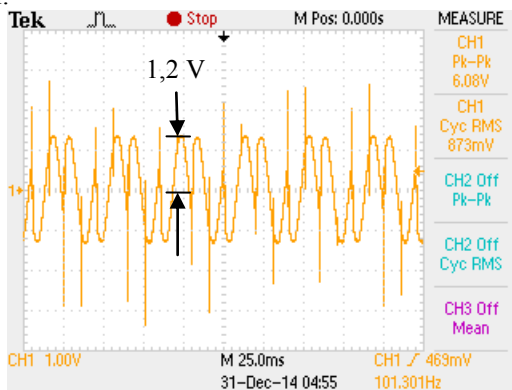


Gambar 4.15 Hasil Pengukuran Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa saat Frekuensi Output *Cycloconverter* 12,5 Hz

Gambar 4.15 menunjukkan hasil pengukuran kecepatan motor induksi satu fasa menggunakan *tachometer*. Pada pengujian tersebut diperoleh kecepatan motor induksi satu fasa sebesar 238,4 rpm. Jika dibandingkan dengan hasil simulasi pada gambar 3.19 maka terdapat perbedaan kecepatan motor induksi sebesar 131,6 rpm. Hal ini disebabkan karena rangkaian *cycloconverter* yang sudah dibuat belum mampu di operasikan pada tegangan rating motor induksi (220Volts).

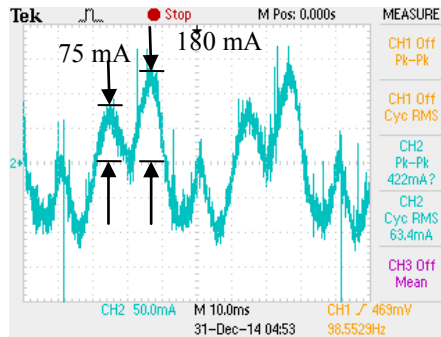
4.3.3.2 Analisis Hasil Pengujian Tegangan dan Arus Motor Induksi

Hasil pengujian tegangan dan arus motor induksi saat frekuensi keluaran *cycloconverter* 25 Hz dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 4.16 Tegangan Keluaran *Cycloconverter* saat Berbeban Motor Induksi, skala *amplifier* yang digunakan 1:100

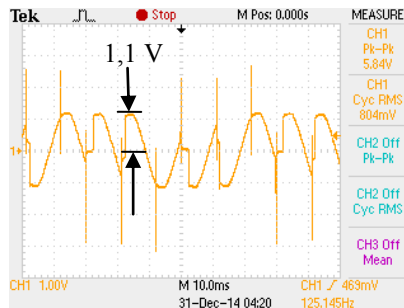
Gambar 4.16 jika dibandingkan dengan hasil simulasi pada gambar 3.15 dapat disimpulkan bahwa bentuk gelombang dari *cycloconverter* yang sudah dibuat sudah sesuai dengan simulasi. Pada gambar diatas dapat dilihat tegangan rms bernilai 873 mV, hal ini disebabkan karena dalam pengukuran tersebut digunakan *instrument amplifier* sebesar 100 kali. Sehingga tegangan sesungguhnya adalah 87,3 volt.



Gambar 4.17 Arus Keluaran *Cycloconverter* saat Berbeban Motor Induksi, skala *amplifier* yang digunakan 1:1

Gambar 4.17 jika dibandingkan dengan hasil simulasi pada gambar 3.22 dapat disimpulkan bahwa bentuk gelombang dari *cycloconverter* yang sudah dibuat sudah sesuai dengan simulasi. Terdapat perbedaan nilai arus dari hasil simulasi dengan arus hasil implementasi yaitu sebesar 6,82 mA.

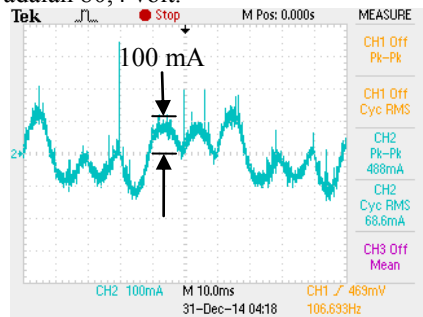
Hasil pengujian tegangan dan arus motor induksi saat frekuensi keluaran *cycloconverter* 16,7 Hz dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 4.18 Tegangan Keluaran *Cycloconverter* saat Berbeban Motor Induksi, skala *amplifier* yang digunakan 1:100

Gambar 4.18 jika dibandingkan dengan hasil simulasi pada gambar 3.17 dapat disimpulkan bahwa bentuk gelombang dari

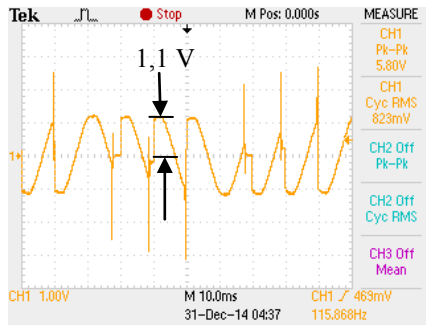
cycloconverter yang sudah dibuat sudah sesuai dengan simulasi. Pada gambar diatas dapat dilihat tegangan rms bernilai 804 mV, hal ini disebabkan karena dalam pengukuran tersebut digunakan *instrument amplifier* sebesar 100 kali. Sehingga tegangan sesungguhnya adalah 80,4 volt.



Gambar 4.19 Arus Keluaran *Cycloconverter* saat Berbeban Motor Induksi, skala *amplifier* yang digunakan 1:1

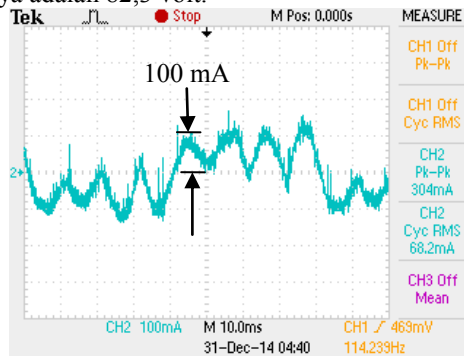
Gambar 4.19 jika dibandingkan dengan hasil simulasi pada gambar 3.23 dapat disimpulkan bahwa bentuk gelombang dari *cycloconverter* yang sudah dibuat sudah sesuai dengan simulasi. Namun, terdapat perbedaan nilai arus dari hasil simulasi dengan arus hasil implementasi yaitu sebesar 13,3 mA.

Hasil pengujian ang tegangan dan arus motor induksi saat frekuensi keluaran *cycloconverter* 12,5 Hz dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 4.20 Tegangan Keluaran *Cycloconverter* saat Berbeban Motor Induksi, skala *amplifier* yang digunakan 1:100

Gambar 4.20 jika dibandingkan dengan hasil simulasi pada gambar 3.19 dapat disimpulkan bahwa bentuk gelombang dari *cycloconverter* yang sudah dibuat sudah sesuai dengan simulasi. Pada gambar diatas dapat dilihat tegangan rms bernilai 823 mV, hal ini disebabkan karena dalam pengukuran tersebut digunakan *instrument amplifier* sebesar 100 kali. Sehingga tegangan sesungguhnya adalah 82,3 volt.



Gambar 4.21 Arus Keluaran *Cycloconverter* saat Berbeban Motor Induksi, skala *amplifier* yang digunakan 1:1

Gambar 4.21 jika dibandingkan dengan hasil simulasi pada gambar 3.24 dapat disimpulkan bahwa bentuk gelombang dari *cycloconverter* yang sudah dibuat sudah sesuai dengan simulasi. Terdapat perbedaan nilai arus dari hasil simulasi dengan arus hasil implementasi yaitu sebesar 15,23 mA.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah seluruh proses perancangan rangkaian *Cycloconverter*, pembuatan, pengujian, serta analisis data selesai, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil implementasi karakteristik gelombang output dari *cycloconverter* saat beban *resistif* sesuai dengan hasil simulasi yang telah dilakukan.
2. Variasi frekuensi *output* hasil implementasi diperoleh 25 Hz, 16,7 Hz, dan 12,5 Hz.
3. Hasil pengujian implementasi *cycloconverter* saat diberi beban motor induksi satu fasa dihasilkan kecepatan sebesar 591,7 rpm saat frekuensi keluaran 25 Hz, kecepatan sebesar 371,7 rpm saat frekuensi keluaran 16,7 Hz, dan kecepatan motor induksi sebesar 238,4 rpm saat frekuensi keluaran 12,5 Hz.

5.2 Saran

Berdasarkan pengerjaan tugas akhir ini, terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan untuk penelitian selanjutnya :

1. Perluantisipasi mengenai frekuensi sumber yang tidak menentu dalam membuat sebuah program kontrol maupun dalam mendesain sebuah *cycloconverter*.
2. Perlu adanya pemilihan komponen yang sesuai dengan simulasi agar rangkaian *cycloconverter* yang telah dibuat dapat bekerja sesuai rating tegangan dari beban motor induksi.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN

PROGRAM MIKROKONTROLER ATMEGA8##

####Program Untuk Frekuensi Output 12,5 Hz####

This program was produced by the

CodeWizardAVR V2.05.0 Evaluation

Automatic Program Generator

© Copyright 1998-2010 Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.

<http://www.hpinfotech.com>

Project :

Version :

Date : 12/20/2014

Author : Freeware, for evaluation and non-commercial
use only

Company :

Comments:

Chip type : ATmega8

Program type : Application

AVR Core Clock frequency: 12.000000 MHz

Memory model : Small

External RAM size : 0

Data Stack size : 256

*****/

#include <mega8.h>

#include <delay.h>

```
bit p=0; bit q=0; bit r=0; bit s=0; bit t=0; bit u=0; bit  
v=0;
```

```
// External Interrupt 0 service routine  
interrupt [EXT_INT0] void ext_int0_isr(void)  
{  
    // Place your code here  
    if(p && q && r && s && t && u && v){  
        delay_us(4500);  
        PORTB.2=!PORTB.2;  
        delay_us(2000);  
        PORTB.2=!PORTB.2;  
        v=0;  
    }  
    else if(p && q && r && s && t && u){  
        delay_us(4500);  
        PORTB.1=!PORTB.1;  
        delay_us(2000);  
        PORTB.1=!PORTB.1;  
        u=0;  
    }  
    else if(p && q && r && s && t){  
        delay_us(4500);  
        PORTB.2=!PORTB.2;  
        delay_us(2000);  
        PORTB.2=!PORTB.2;  
        t=0;  
    }  
    else if(p && q && r && s){  
        delay_us(4500);  
        PORTB.2=!PORTB.2;  
        delay_us(2000);  
    }  
}
```

```

PORTB.2=!PORTB.2;
s=0;
}
else if(p && q && r){
delay_us(4500);
PORTB.1=!PORTB.1;
delay_us(2000);
PORTB.1=!PORTB.1;
r=0;
}
else if(p && q){
delay_us(4500);
PORTB.2=!PORTB.2;
delay_us(2000);
PORTB.2=!PORTB.2;
q=0;
}
else if(p){
delay_us(4500);
PORTB.1=!PORTB.1;
delay_us(2000);
PORTB.1=!PORTB.1;
p=0;
}
else{
delay_us(4500);
PORTB.1=!PORTB.1;
delay_us(2000);
PORTB.1=!PORTB.1;
p=1; q=1; r=1; s=1; t=1; u=1; v=1;
}
}
}

```

```

// Declare your global variables here

void main(void)
{
// Declare your local variables here

// Input/Output Ports initialization
// Port B initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In
Func2=Out Func1=Out Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T
State2=0 State1=0 State0=T
PORTB=0x00;
DDRB=0x06;

// Port C initialization
// Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In
Func1=In Func0=In
// State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T
State1=T State0=T
PORTC=0x00;
DDRC=0x00;

// Port D initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In
Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T
State2=T State1=T State0=T
PORTD=0x00;
DDRD=0x00;

```

```
// Timer/Counter 0 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 0 Stopped
TCCR0=0x00;
TCNT0=0x00;
```

```
// Timer/Counter 1 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer1 Stopped
// Mode: Normal top=0xFFFF
// OC1A output: Discon.
// OC1B output: Discon.
// Noise Canceler: Off
// Input Capture on Falling Edge
// Timer1 Overflow Interrupt: Off
// Input Capture Interrupt: Off
// Compare A Match Interrupt: Off
// Compare B Match Interrupt: Off
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=0x00;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;
```

```
// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer2 Stopped
```

```

// Mode: Normal top=0xFF
// OC2 output: Disconnected
ASSR=0x00;
TCCR2=0x00;
TCNT2=0x00;
OCR2=0x00;

// External Interrupt(s) initialization
// INT0: On
// INT0 Mode: Rising Edge
// INT1: Off
GICR|=0x40;
MCUCR=0x03;
GIFR=0x40;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x00;

// USART initialization
// USART disabled
UCSRB=0x00;

// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1:
Off
ACSR=0x80;
SFIOR=0x00;

// ADC initialization
// ADC disabled
ADCSRA=0x00;

```

```

// SPI initialization
// SPI disabled
SPCR=0x00;

// TWI initialization
// TWI disabled
TWCR=0x00;

// Global enable interrupts
#asm("sei")

while (1)
{
    // Place your code here

}
}
### Program untuk Frekuensi Output 16,7 Hz###
/*****
*****

```

This program was produced by the
 CodeWizardAVR V2.05.0 Evaluation
 Automatic Program Generator
 © Copyright 1998-2010 Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.
<http://www.hpinfotech.com>

Project :
 Version :
 Date : 24/12/2014
 Author : Freeware, for evaluation and non-commercial
 use only

Company :
Comments:

Chip type : ATmega8
Program type : Application
AVR Core Clock frequency: 12,000000 MHz
Memory model : Small
External RAM size : 0
Data Stack size : 256

*****/

```
#include <mega8.h>
#include <delay.h>
```

```
bit p=0; bit q=0;
```

```
// External Interrupt 0 service routine
interrupt [EXT_INT0] void ext_int0_isr(void)
{
// Place your code here
    if(p && q){
        delay_us(4500);
        PORTB.2=!PORTB.2;
        delay_us(2000);
        PORTB.2=!PORTB.2;
        q=0;
    }
    else if(p){
        delay_us(4500);
        PORTB.1=!PORTB.1;
```

```

    delay_us(2000);
    PORTB.1=!PORTB.1;
    p=0;
    }
    else{
    delay_us(4500);
    PORTB.1=!PORTB.1;
    delay_us(2000);
    PORTB.1=!PORTB.1;
    p=1; q=1;
    }
}

void main(void)
{
// Declare your local variables here

// Input/Output Ports initialization
// Port B initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In
Func2=Out Func1=Out Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T
State2=0 State1=0 State0=T
PORTB=0x00;
DDRB=0x06;

// Port C initialization
// Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In
Func1=In Func0=In
// State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T
State1=T State0=T
PORTC=0x00;

```

```

DDRC=0x00;

// Port D initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In
Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T
State2=T State1=T State0=T
PORTD=0x00;
DDRD=0x00;

// Timer/Counter 0 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 0 Stopped
TCCR0=0x00;
TCNT0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer1 Stopped
// Mode: Normal top=0xFFFF
// OC1A output: Discon.
// OC1B output: Discon.
// Noise Canceler: Off
// Input Capture on Falling Edge
// Timer1 Overflow Interrupt: Off
// Input Capture Interrupt: Off
// Compare A Match Interrupt: Off
// Compare B Match Interrupt: Off
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=0x00;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;

```

```

ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;

// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer2 Stopped
// Mode: Normal top=0xFF
// OC2 output: Disconnected
ASSR=0x00;
TCCR2=0x00;
TCNT2=0x00;
OCR2=0x00;

// External Interrupt(s) initialization
// INT0: On
// INT0 Mode: Rising Edge
// INT1: Off
GICR|=0x40;
MCUCR=0x03;
GIFR=0x40;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x00;

// USART initialization
// USART disabled
UCSRB=0x00;

```

```

// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1:
Off
ACSR=0x80;
SFIOR=0x00;

// ADC initialization
// ADC disabled
ADCSRA=0x00;

// SPI initialization
// SPI disabled
SPCR=0x00;

// TWI initialization
// TWI disabled
TWCR=0x00;

// Global enable interrupts
#asm("sei")

while (1)
{
    // Place your code here

}
}
###Program untuk Frekuensi Output 25 Hz###
/*****
*****

```

This program was produced by the

CodeWizardAVR V2.05.0 Professional
Automatic Program Generator
© Copyright 1998-2010 Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.
<http://www.hpinfotech.com>

Project :
Version :
Date : 11/25/2014
Author :
Company :
Comments:

Chip type : ATmega8
Program type : Application
AVR Core Clock frequency: 11.059200 MHz
Memory model : Small
External RAM size : 0
Data Stack size : 256

*****/

```
#include <mega8.h>  
#include <delay.h>  
#include <stdio.h>
```

```
bit p=0; bit q=0; bit r=0;
```

```
// External Interrupt 0 service routine  
interrupt [EXT_INT0] void ext_int0_isr(void)  
{
```

```

// Place your code here
if(p && q && r){
    delay_us(4500);
    PORTB.1=!PORTB.1;
    delay_us(2000);
    PORTB.1=!PORTB.1;
    r=0;
}
else if(p && q){
    delay_us(4500);
    PORTB.1=!PORTB.1;
    delay_us(2000);
    PORTB.1=!PORTB.1;
    q=0;
}
else if(p){
    delay_us(4500);
    PORTB.2=!PORTB.2;
    delay_us(2000);
    PORTB.2=!PORTB.2;
    p=0;
}
else {
    delay_us(4500);
    PORTB.2=!PORTB.2;
    delay_us(2000);
    PORTB.2=!PORTB.2;
    p=1; q=1; r=1;
}

}

```

```

// Declare your global variables here

void main(void)
{
// Declare your local variables here

// Input/Output Ports initialization
// Port B initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In
Func2=Out Func1=Out Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T
State2=0 State1=0 State0=T
PORTB=0x00;
DDRB=0x06;

// Port C initialization
// Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In
Func1=In Func0=In
// State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T
State1=T State0=T
PORTC=0x00;
DDRC=0x00;

// Port D initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In
Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=P State6=T State5=T State4=T State3=T
State2=T State1=T State0=T
PORTD=0x80;
DDRD=0x00;

// Timer/Counter 0 initialization

```



```

// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer 0 Stopped
TCCR0=0x00;
TCNT0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer1 Stopped
// Mode: Normal top=0xFFFF
// OC1A output: Discon.
// OC1B output: Discon.
// Noise Canceler: Off
// Input Capture on Falling Edge
// Timer1 Overflow Interrupt: Off
// Input Capture Interrupt: Off
// Compare A Match Interrupt: Off
// Compare B Match Interrupt: Off
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=0x00;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;

// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer2 Stopped
// Mode: Normal top=0xFF

```

```

// OC2 output: Disconnected
ASSR=0x00;
TCCR2=0x00;
TCNT2=0x00;
OCR2=0x00;

// External Interrupt(s) initialization
// INT0: On
// INT0 Mode: Rising Edge
// INT1: Off
GICR|=0x40;
MCUCR=0x03;
GIFR=0x40;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x00;

// USART initialization
// USART disabled
UCSRB=0x00;

// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1:
Off
ACSR=0x80;
SFIOR=0x00;

// ADC initialization
// ADC disabled
ADCSRA=0x00;

```

```
// SPI initialization
// SPI disabled
SPCR=0x00;

// TWI initialization
// TWI disabled
TWCR=0x00;

// Global enable interrupts
#asm("sei")

while (1)
{
    // Place your code here
}
}
```

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang selalu melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan Sarjana strata pertama di Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, ITS. Tugas Akhir ini berjudul :

Desain dan Implementasi *Cycloconverter* Satu Fasa dengan Empat Triac

Penulis juga menyampaikan banyak terima kasih kepada pihak – pihak yang terlibat dan mendukung pengerjaan Tugas Akhir ini, antara lain:

1. Kedua orang tua saya dan saudara-saudara yang telah memberikan dukungan moral, nasehat dan do'a selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr.Ir. Mochamad Ashari, M.Eng sebagai pembimbing I dan Bapak Dedet Candra Riawan S.T., M.Eng., Ph.D. sebagai pembimbing II yang selalu memberi bimbingan, arahan, dan saran dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Direktur Jenderal Pendidikan Tinggi (Dirjen Dikti) yang memberikan beasiswa BIDIK MISI, sehingga saya dapat menempuh pendidikan di jurusan Teknik Elektro ITS.
4. Segenap Sivitas Akademika ITS terutama Jurusan Teknik Elektro yang sudah terlibat dan membantu selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penulis berharap melalui buku Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan menjadi sumbangan pikiran bagi kita semua dalam berprestasi untuk turut mengisi pembangunan bangsa dan negara.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

NUMENCLATURE

SCR	=	<i>Silico- controlled rectifier</i>
P-Converter	=	Membentuk gelombang keluaran positif
N-Converter	=	Membentuk gelombang keluaran negatif
dv/dt	=	Perubahan tegangan terhadap waktu
MT1	=	Terminal Triac yang pertama
MT2	=	Terminal Triac yang kedua
I^+	=	Kuadran pertama
III^-	=	Kuadran ketiga
i	=	Arus
v	=	Tegangan
p	=	Daya
B_s	=	Medan magnet resultan
B_{cw}	=	Medan magnet yang berputar searah jarum jam
B_{ccw}	=	Medan magnet yang berputar berlawanan jarum jam
T_f	=	Torsi <i>forward flux</i>
T_b	=	Torsi <i>backward flux</i>
R_1	=	Resistansi dari kumparan stator
X_1	=	Reaktansi bocor dari kumparan stator
X_{mag}	=	Reaktansi magnetik
X'_2	=	Reaktansi bocor rotor dari referensi stator
R'_2	=	Resistansi rotor dari referensi stator
V_1	=	Sumber tegangan
E	=	Tegangan yang diinduksikan pada kumparan stator
E_f	=	Tegangan yang diinduksikan pada kumparan stator saat <i>forward</i>
E_b	=	Tegangan yang diinduksikan pada kumparan stator saat <i>backward</i>
Z_f	=	Impedansi <i>forward</i>
Z_b	=	Impedansi <i>backward</i>
P_{gf}	=	<i>Forward Air gap power</i>
P_{gb}	=	<i>Backward Air gap power</i>
S	=	<i>Slip</i>
T_f	=	Torsi maju
T_b	=	Torsi mundur

P _{mech}	=	Daya mekanik
T	=	Torsi resultan
PNP	=	<i>Positif Negatif Positif</i>
rad/s	=	radian per sekon
rms	=	Nilai rata-rata (<i>root mean squer</i>)
f _i	=	Frekuensi masukan
f _o	=	Frekuensi keluaran
rpm	=	Putaran per menit
V _{in}	=	Tegangan masukan
v _{out}	=	Tegangan keluaran
N _s	=	kecepatan dimana kecepatan medan putar stator sama dengan kecepatan putar medan rotor

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBARPERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Metodologi Penelitian	2
1.6 Sistematika Laporan	4
1.7 Relevansi	4
 BAB II TRIAC SEBAGAI RANGKAIAN SWITCH PADA CYCLOCONVERTER DAN MOTOR INDUKSI SATU FASA SEBAGAI BEBAN INDUKTIF	
2.1 <i>Cycloconverter</i>	5
2.2 Triac (<i>Bidirectional Thyristor</i>)	6
2.3 Motor Induksi	8
2.3.1 Prinsip Kerja	9
2.3.2 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Satu Fasa	12
 BAB III PERANCANGAN DAN SIMULASI CYCLOCONVERTER SATU FASA	
3.1 Sistem Rangkaian <i>Cycloconverter</i> Satu Fasa	17
3.2 Pemodelan <i>Cycloconverter</i>	18
3.2.1 Prinsip Kerja	18
3.3 Perancangan Sensor Tegangan dan <i>Zero Crossing Detector</i>	20
3.4 Perancangan Driver Triac	20
3.5 Simulasi <i>Cycloconverter</i> Satu Fasa	21

3.6 Penentuan Sudut Penyalaan	30
-------------------------------------	----

BAB IV IMPLEMENTASI, PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA HASIL KELUARAN *CYCLOCONVERTER* SATU FASA

4.1 Implementasi <i>Cycloconverter</i>	33
4.1.1 Implementasi Sensor Tegangan dan Zero Crossing Detector (ZCD)	34
4.1.2 Implementasi <i>Driver</i> Triac	34
4.1.3 Implementasi Rangkaian <i>Cycloconverter</i>	35
4.2 Pengujian Sinyal <i>Switching Cycloconverter</i>	36
4.2.1 Pengujian Sinyal <i>Switching</i> Hasil <i>Mikrokontroller</i>	36
4.2.2 Pengujian Output <i>Cycloconverter</i>	37
4.2.3 Pengujian <i>Cycloconverter</i> Beban Resistif dengan Tegangan <i>Input</i> Berbeda-beda	39
4.2.4 Pengujian Arus Input dan Arus Output saat Beban Resistif	42
4.3 Analisis Data Pengujian <i>Cycloconverter</i>	43
4.3.1 Analisis Pengujian Sinyal <i>Switching Cycloconverter</i>	43
4.3.2 Analisis Hasil Pengujian <i>Output</i> <i>Cycloconverter</i> Beban <i>Resistif</i>	44
4.3.3 Analisis Hasil Pengujian <i>Cycloconverter</i> Beban Motor	44

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran	51

DAFTAR PUSTAKA	53
-----------------------------	----

LAMPIRAN	55
-----------------------	----

RIWAYAT HIDUP	73
----------------------------	----

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Rating Komponen yang Umum Disertakan.....	7
Tabel 4.1.1	Pengujian beban rasistif untuk frekuensi 25 Hz	35
Tabel 4.1.2	Pengujian beban resistif untuk frekuensi 16,7 Hz	35
Tabel 4.1.3	Pengujian beban resistif untuk frekuensi 12,5 Hz	36

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	(a) Rangkaian Cycloconverter Satu Fasa (b) Rangkaian Ekuivalen pengganti Cycloconverter	5
Gambar 2.2	Gelombang masukan dan keluaran cycloconverter dari 50 Hz ke 16,7 Hz dengan beban resistif.	6
Gambar 2.3	Simbol dan karakteristik $v - i$ dari TRIAC.....	8
Gambar 2.4	Konfigurasi motor induksi satu fasa	9
Gambar 2.5	Dua buah medan magnet yang bergerak dengan arah yang berlawanan	10
Gambar 2.6	Kurva torsi-kecepatan pada motor induksi tiga fasa secara teori	11
Gambar 2.7	Gelombang arus, tegangan, dan daya pada motor induksi satu fasa.....	11
Gambar 2.8	Kurva Torsi-Kecepatan yang sebenarnya pada motor induksi satu fasa ..	12
Gambar 2.9	Rangkaian ekuivalen motor	13
Gambar 3.1	Sistem Rangkaian <i>Cycloconverter</i> Satu Fasa.....	17
Gambar 3.2	Rangkaian <i>Cycloconverter</i> Satu Fasa	18
Gambar 3.3	Prinsip Kerja <i>Cycloconverter</i>	18
Gambar 3.4	Gate 1 dan gate 4 konduksi saat sumber AC positif.	19
Gambar 3.5	Gate 2 dan gate3 konduksi saat sumber AC negatif	19
Gambar 3.6	Gate 2 dan gate 3 konduksi saat sumber AC positif	19
Gambar 3.7	Gate 1 dan gate 4 konduksi saat sumber AC negatif	20
Gambar 3.8	Skema rangkaian Sensor Tegangan dan ZCD.....	20
Gambar 3.9	Skema Rangkaian <i>Driver</i>	21
Gambar 3.10	Gambar rangkaian <i>cycloconverter</i> beban resistif....	22
Gambar 3.11	Gambar rangkaian cycloconverter beban motor induksi.....	22
Gambar 3.12	Hasil simulasi untuk 25 Hz.....	23
Gambar 3.13	Hasil simulasi untuk 16.7 Hz	24
Gambar 3.14	Hasil simulasi untuk 12.5 Hz	25
Gambar 3.15	Hasil simulasi tegangan pada motor induksi untuk frekuensi output 25 Hz.....	26
Gambar 3.16	Hasil simulasi kecepatan motor induksi untuk frekuensi output 25 Hz.....	27
Gambar 3.17	Hasil simulasi tegangan pada motor induksi untuk frekuensi output 16,7 Hz.....	27

Gambar 3.18	Hasil simulasi kecepatan motor induksi untuk frekuensi output 16.7 Hz.....	28
Gambar 3.19	Hasil simulasi tegangan pada motor induksi untuk frekuensi output 12,5 Hz.....	28
Gambar 3.20	Hasil simulasi kecepatan motor induksi untuk frekuensi output 12.5 Hz.....	29
Gambar 3.21	Hasil simulasi kecepatan motor induksi saat dioperasikan secara DOL.....	29
Gambar 3.22	Hasil Simulasi Arus Keluaran Saat Frekuensi Keluaran 25 Hz	30
Gambar 3.23	Hasil Simulasi Arus Keluaran Saat Frekuensi Keluaran 16,7 Hz.....	30
Gambar 3.24	Hasil Simulasi Arus Keluaran Saat Frekuensi Keluaran 12,5 Hz	31
Gambar 4.1	Cycloconverter Berbasis Mikrokontroler.....	33
Gambar 4.2	Rangkaian Sensor Tegangan dan ZCD	34
Gambar 4.3	Rangkaian <i>Driver Triac</i>	35
Gambar 4.4	Rangkaian <i>Cycloconverter</i>	36
Gambar 4.5	Sinyal <i>Switching</i> Hasil Mikrokontroler.....	37
Gambar 4.6	Hasil Output Cycloconverter Beban Resistif	38
Gambar 4.7	Grafik tegangan <i>output</i> dan tegangan <i>inputcycloconverter</i> 25 Hz.....	40
Gambar 4.8	Grafik tegangan <i>output</i> dan tegangan <i>inputcycloconverter</i> 16.7 Hz	41
Gambar 4.9	Grafik tegangan <i>output</i> dan tegangan <i>inputcycloconverter</i> 12.5 Hz	41
Gambar 4.10	Tegangan Output, arus input dan arus output pada frekuensi 25 Hz.....	42
Gambar 4.11	Tegangan Output, arus input dan arus output pada frekuensi 16,7 Hz.....	42
Gambar 4.12	Tegangan Output, arus input dan arus output pada frekuensi 12,5 Hz.....	43
Gambar 4.13	Hasil Pengukuran Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa saat Frekuensi Output Cycloconverter 25 Hz .	44
Gambar 4.14	Hasil Pengukuran Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa saat Frekuensi Output Cycloconverter 16,7Hz	45
Gambar 4.15	Hasil Pengukuran Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa saat Frekuensi Output Cycloconverter 12,5Hz	45

Gambar 4.16	Tegangan Keluaran Cycloconverter saat Berbeban Motor Induksi	46
Gambar 4.17	Arus Keluaran <i>Cycloconverter</i> saat Berbeban Motor Induksi	47
Gambar 4.18	Tegangan Keluaran <i>Cycloconverter</i> saat Berbeban Motor Induksi	47
Gambar 4.19	Arus Keluaran <i>Cycloconverter</i> saat Berbeban Motor Induksi	48
Gambar 4.20	Tegangan Keluaran Cycloconverter saat Berbeban Motor Induksi	48
Gambar 4.21	Arus Keluaran Cycloconverter saat Berbeban Motor Induksi	49

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

INDEKS

A

Air gap power, 15
Amplifier, 46, 47, 48
ATMEGA 8, 33, 36

B

Backward flux , 12
BT139, 35

C

Cycloconverter, 1, 2, 4, 5, 6, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 51

D

Dioda, 20, 21, 33
Double revolving-field theory, 9, 14
Driver triac, 34, 35, 43

E

Eksitasi, 7, 8, 13, 14

F

Frekuensi variable 1.,
Forward flux, 12
Fullbridge, 34

G

Grafik, 40, 41

H

Hubung singkat, 26, 31

I

Igate, 35
Implementasi, 1, 3, 33, 34, 35, 49
Induksi, 17, 20

K

Kecepatan sinkron, 12
Kerapatan flux, 9, 34
Kumparan, 14
Kurva, 11, 12

M

Mikrokontroler, 2, 17, 18, 20, 21, 33
Magnetic-motive-force, 12
Measure, 46, 47, 48, 49
Medan magnet, 9, 10, 12
Motor induksi, 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 22, 26, 27, 28, 29, 30, 31
MT1, 8
MT2, 8

N

N-Converter, 5

O

Optocoupler, 2, 34
Overlapping, 26, 27, 28

P

P-Converter, 5
Pmech, 15
Prototype, 3
Photo diode, 21

R

Resistor, 2, 38, 39, 40, 42, 43
Rpm, 27, 28, 29, 44, 45
Rotor, 13, 15

S

Silicon-controlled rectifier, 5,
Sinyal switching, 36, 37
Slip, 18, 19, 20, 21, 27, 28, 37, 43, 48, 56, 57, 59
Stator, 9, 12, 13
Software, 21

T

Tachometer, 46

Time, 23, 24, 25

TLP250, 33

Transistor gate driver, 2

Thyristor, 1, 6

Torsi, 11, 12

Triac, 2, 6, 7, 8, 18, 19, 20, 21, 22

Z

Zero crossing detector, 2, 17, 33, 34

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Zuhail, *Dasar Tenaga Listrik*, Penerbit ITB Bandung, 1991
- [2]. Mohan, N., *Power Electronic, Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
- [3]. Muhammad H Rashid, *Elektronika Daya, Rangkaian, Devais dan Aplikasinya*, Jilid 1, Edisi Bahasa PT Prenhallindo, Jakarta, 1993.
- [4]. A. P. Malvino, *Electronics Principles*, 6th Edition, 1999, The McGraw Hill-Companies, Inc., USA
- [5]. J. Millman and Taub, *Pulse, digital and switching wave forms*, 4th Edition, 2008, The McGraw Hill-Companies Inc. USA.
- [6]. Chapman, Stephen J., 2005. *Electric Machinery Fundamentals*. New York: McGraw-Hill.
- [7]. Sen, P.C. 1997. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. Ontario: John Wiley & Sons, Inc.
- [8]. Bandyopadhyay, M.N. 2006. *Control Engineering: Theory & Practice*. New Delhi: Prentice-Hall India.
- [9]. Boldea, Ion dan Syed A. Nasar. 2002. *The Induction Machine Handbook*. Florida: CRC Press.
- [10]. Bose, Bimal K. 2002. *Modern Power Electronics and AC Drives*. New Jersey: Prentice Hall PTR.
- [11]. Huges, Austin. 2006. *Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications Third Edition*. Oxford: Elsevier Ltd.
- [12]. Mazda, Fraidoon. 1997. *Power Electronics Handbook 3rd Edition*. Oxford: Newnes.
- [13]. Songchun Zhang, Fenglin Wu, Shmin Shen, Shuchun Yang, "A Digital Controller Based Cycloconverter – Fed Drive", 1997 IEEE Transaction, pp. 637-641
- [14]. Maamoun, A., "Development of cycloconverters," Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2003. IEEE CCECE Vol.1, 4-7, pp.521 –524 May 2003.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Djainal Arifin, lahir di Mojokerto 24 September 1990. Penulis tamat dari bangku sekolah dasar di SDN Temuireng 2 Mojokerto tahun 2003 dan melanjutkan sekolah menengah pertama di SMPN 1 Dawar blandong, Mojokerto. Kemudian pada tahun 2007 melanjutkan sekolah ke SMAN 1 Sooko, Mojokerto. Pada tahun 2010, penulis melanjutkan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya jurusan Teknik Elektro. Konsentrasi yang diambil adalah bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Putra pasangan Nariyono dan Eni Sukarti ini aktif dalam organisasi KALAM HIMATEKTRO dan UKM Robotic ITS. Penulis juga tergabung dengan member Lab KonversiEnergi. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email: djainal.arifin@ymail.com

[Halaman ini sengaja dikosongkan]